



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

TESTER KABELÁŽE

CABLE HARNESS TESTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Valenta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Burian, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Jakub Valenta

ID: 195459

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Tester kabeláže

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešerši existujících testerů kabelových svazků, s důrazem na principy měření propojení a izolačního odporu
2. Navrhněte konstrukci testeru kabeláže pro kabelové svazky do 16 koncových pinů. Kontrola správnosti propojení při max. 1mA, izolační odpor měřený při max. 100V DC.
3. Hlavní obvody navrženého zařízení realizujte na malých modulech pro ověření správnosti návrhu
4. Navrhněte plošný spoj plnící funkci, tento spoj realizujte
5. Vytvořte ovládací software které za pomoci jednoduché textové parametrizace otestuje propojení kabelového svazku a vytvoří textový protokol z měření.
6. Funkčnost zařízení otestujte na dodaných vzorcích kabelu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Bl, Zhuming, Carlos POMALAZA-RÁEZ, Dustin HERSHBERGER, Jeremy DAWSON, Andrew LEHMAN, John YUREK a Jared BALL. Automation of Electrical Cable Harnesses Testing. Robotics. 2018, 7(1). DOI: 10.3390/robotics7010001. ISSN 2218-6581. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2218-6581/7/1/1>

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 17.5.2021

Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce pojednává o problematikách testování a zkoušení požadavků na kabely a kabelové svazky. Tyto termíny jsou v práci definovány a je popsán rozdíl v jejich významu. Práce rovněž popisuje charakteristické vlastnosti kabelů a kabelových svazků, vysvětluje jejich důležitost a detailněji se zaměřuje na variabilní vlastnosti, které se s časem mění nebo jsou závislé na chybách při výrobě. Principy a průběhy zkoušek právě těchto vlastností jsou následně v práci přiblíženy a jsou podstatou následné praktické části. V té se práce zabývá návrhem a realizací prototypu měřicího obvodu pro zkoušky izolačního odporu kabelů a zkoušky správnosti propojení ve svazcích. Tento návrh je poté fyzicky realizován, postup návrhu i realizace podrobně popsán a funkčnost prototypu je testována a prezentována.

KLÍČOVÁ SLOVA

vodič, kabel, kabelový svazek, izolační odpor, dielektrická pevnost, propojení, kontinuita, test, zkouška, tester

ABSTRACT

This semestral paper deals with the issues of testing and requirements examinations for cables and cable harnesses. These terms are defined in the work and the difference in their meaning is described. The work also describes the characteristic features of cables and cable harnesses, explains their importance and focuses in more detail on the variable properties that may change over time or that are dependent on manufacturing errors. The principles and procedures of tests of these properties are covered in the work and are the essence of the subsequent practical part. In this part, the work deals with the design of the measuring circuit prototype for testing of the insulation resistance of cables and their desired continuity in bundles. This design is then physically implemented, the processes of designing and implementing are described in detail and finally its functionality is tested and presented to the reader.

KEYWORDS

conductor, cable, cable harness, insulation resistance, dielectric strength, connections, continuity, test, examination, tester

VALENTA, Jakub. *Tester kabeláže*. Brno, 2021, 79 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Tester kabeláže“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému dobrému příteli, panu Ing. Michalu Rišovi, za jeho velkou podporu, dobré rady, podnětné konzultace k tématu a především jeho obětavost, kterými mě při řešení této práce zásoboval a díky nimž jsem ji také mohl zdárně dokončit.

Další mé díky patří mému kolegovi a příteli, panu Ing. Davidu Novákovi, jehož odborné konzultace a rady měly na výslednou práci taktéž velký vliv.

Rovněž děkuji i svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Františku Burianovi, PhD., za jeho podněty a návrhy především v začátcích práce, a také za důležitou motivaci v těžkých chvílích, které mě v průběhu práce zastihly.

Obsah

Úvod	10
1 Kabelové svazky a jejich vlastnosti	11
1.1 Definice kabelů a kabelových svazků	11
1.2 Charakteristické vlastnosti kabelů	14
1.3 Testované vlastnosti kabelových svazků	15
1.3.1 Izolační odpor	15
1.3.2 Dielektrická pevnost	16
1.3.3 Správnost propojení	16
1.3.4 Přechodový odpor	17
2 Vybrané testy kabelových svazků	18
2.1 Princip testu izolačního odporu	18
2.2 Princip testu správnosti propojení	19
2.3 Princip testu dielektrické pevnosti	20
2.4 Další požadavky na testování	21
3 Návrh kabelového testeru	22
3.1 Analýza požadavků	22
3.2 Průzkum trhu	23
3.2.1 Sefelec Synor 5000	23
3.2.2 Cirris CH2	24
3.2.3 Weetech W 434	25
3.2.4 Dynalab NX Hipot	25
3.2.5 Adaptronic KT 638	27
3.2.6 Voltcraft CT-7	27
3.3 Návrh vlastního řešení	28
3.3.1 Zdroje napájecího a měřicího napětí	29
3.3.2 Omezení a detekce měřicího proudu	30
3.3.3 Technologie vícekanálového přepínače	31
3.3.4 Návrh dalších částí obvodu	34
4 Realizace kabelového testeru	37
4.1 Stanovení konečných požadavků	37
4.2 Výběr potřebných komponent	39
4.2.1 DC/DC měniče	39
4.2.2 MOSFET tranzistory	41
4.2.3 Integrované obvody	41

4.2.4	Raspberry Pi	42
4.2.5	Rezistory, kondenzátory, diody	44
4.2.6	Konektory	44
4.3	Návrh obvodového schématu zapojení	45
4.3.1	Návrh schématu napájecího obvodu	45
4.3.2	Návrh schématu spínačového obvodu	50
4.3.3	Pozdější úpravy schémat	53
4.4	Návrh desek plošných spojů	53
4.4.1	DPS napájecího obvodu	54
4.4.2	DPS spínačového obvodu	55
4.5	Vytvoření ovládacího software	57
5	Testování realizovaného zařízení	62
	Závěr	65
	Literatura	66
	Seznam příloh	70
A	Schéma napájecího obvodu	71
B	Schéma spínačového obvodu	72
C	Návrh DPS napájecího obvodu	73
D	Návrh DPS spínačového obvodu	75
E	Struktura přiloženého média	79

Seznam obrázků

1.1	Ilustrační foto kabelového svazku	12
1.2	Ilustrační foto kabelové sestavy	13
1.3	Unikající proudy jednožilového kabelu	16
2.1	Závislost odečítané hodnoty na čase měření	19
2.2	Vývojový diagram zkoušky kontinuity	20
3.1	Zařízení Synor 5000P	24
3.2	Zařízení Cyrris CH2	25
3.3	Zařízení WEETECH W 434	26
3.4	Zařízení Dynalab NX Hipot	26
3.5	Zařízení Adaptronic KT 638	27
3.6	Zařízení Voltcraft CT-7	28
3.7	Schéma zapojení MOSFET přepínačů	32
4.1	DC/DC měnič model A01P-12	40
4.2	DC/DC měnič model CM02-ADJ	40
4.3	Mikropočítač Raspberry Pi Zero WH	43
4.4	Zapojení DC/DC měničů	45
4.5	Zapojení děliče napětí pro řídicí vstup měniče	46
4.6	Propojení dvou oddělených zemních potenciálů	47
4.7	Zapojení AD převodníku	48
4.8	Zapojení logických optočlenů	49
4.9	Zapojení požadovaných sítí do konektorů	49
4.10	Zapojení posuvných registrů	50
4.11	Zapojení asynchronního nulování	51
4.12	Zapojení jednoho kanálu přepínače	52
4.13	Zapojení vstupních a výstupních konektorů	52
4.14	Konektor pro připojení testovaného kabelu	53
4.15	3D vizualizace horní vrstvy DPS napájecího obvodu	54
4.16	3D vizualizace spodní vrstvy DPS napájecího obvodu	55
4.17	3D vizualizace horní vrstvy DPS spínačového obvodu	56
4.18	3D vizualizace spodní vrstvy DPS spínačového obvodu	56
4.19	Fotografie výsledného prototypu	57
4.20	Kód funkce pro komunikaci s AD převodníkem	58
4.21	Kód funkce realizující bit bang	59
4.22	Kód převodu napětí na hodnotu izolačního odporu	60
5.1	Výsledky prvního testu zařízení.	62
5.2	Výsledky druhého testu zařízení	63
5.3	Výsledky třetího testu zařízení	64

C.1	Návrh horní vrstvy DPS napájecího obvodu	73
C.2	Návrh spodní vrstvy DPS napájecího obvodu	74
D.1	Návrh horní vrstvy DPS spínačového obvodu	75
D.2	Návrh první vnitřní vrstvy DPS spínačového obvodu	76
D.3	Návrh druhé vnitřní vrstvy DPS spínačového obvodu	77
D.4	Návrh spodní vrstvy DPS spínačového obvodu	78

Úvod

S rozmachem elektrifikace a automatizace všech výrobních i každodenních procesů je nutné používat čím dál více kabeláže. Ta je jednak potřebná pro rozvody elektrického proudu, tedy pro napájení veškerých elektrických přístrojů a spotřebičů, jednak také pro přenos signálů, dat a jiných informací. Je pochopitelné, že pro složitější systémy je potřeba větší množství kabeláže. Při chaotickém uspořádání kabeláže větších systémů snadno dojde k chybě zapojení, minimálně však bude takový systém nepřehledný.

Je žádoucí uspořádat vedení tak, aby bylo organizované, přehledné a jednoduché. Jednou z možností je pro tento účel využít kabely a z nich složené kabelové svazky. Tím je sice možné získat velmi jasnou strukturu vedení, stane se tak ale na úkor jednoduché analýzy jednotlivých kabelů. Pokud se v kterékoliv části kabelového svazku některý z kabelů poškodí, či dojde k záměně připojení na jednom z konců svazku, může tato chyba poškodit velmi cenná zařízení. Je tudíž třeba dbát na pravidelná a detailní testování – při výrobě, před instalací, pravidelně během užívání. Z důvodu rozsáhlosti systémů ale takové testování není jednoduché a vyžaduje mnoho zdrojů, jak časových, tak lidských. Přestože je v mnoha případech nutné ruční testování, přirozeně je v této oblasti snaha náročnost zmíněných zdrojů minimalizovat a celý proces testování co nejvíce algoritmizovat a automatizovat.

Předmětem této práce je zanalyzovat principy potřebných testů kabelů a kabelových svazků, navrhnout a následně sestavit jednoduché zařízení provádějící tyto typy testů a zajistit jejich automatizaci formou programovatelného mikropočítače. V první části se práce zabývá definicí výrazů, jako např. „kabel“ a „kabelový svazek“, charakteristickými vlastnostmi těchto prvků a podrobnější definicí těch jejich vlastností, jež bude třeba testovat. Dále budou popsány principy a postupy, na nichž jsou zmíněné testy postaveny. Těchto znalostí pak bude využito v závěrečné, hlavní části práce, kde bude provedena podrobná analýza zadání a požadavků, tyto budou srovnány s na trhu existujícími řešeními a následně využity při návrhu zmíněného testeru kabeláže. Navržený tester bude sestaven, přičemž procesy návrhu i realizace budou podrobně popsány.

1 Kabelové svazky a jejich vlastnosti

Dříve než se práce zaměří na principy testování kabelových svazků, je vhodné zavést a definovat některé pojmy, které budou v práci dále užívány a zmiňovány. V následujících podkapitolách budou vysvětleny základní pojmy, jako např. „kabel“ a „kabelový svazek“, které se dále rozdělí dle účelu jejich použití. Mimo jiné zde bude také zavedena terminologie, včetně vysvětlení chybných označení. Následně se v této kapitole popíše vlastnosti kabelů, upřesnění důležitost těchto vlastností, požadavky na ně kladené a podmínky jejich testování. Z těchto vlastností pak budou podrobněji charakterizovány ty, jejichž testování bude, vzhledem k zadání práce, dále vyžadováno.

1.1 Definice kabelů a kabelových svazků

Aby bylo možné definovat pojem „kabelový svazek“, jenž přirozeně naznačuje, že se bude jednat o seskupení několika jednotlivých kabelů, bude nutné v první řadě definovat právě onen pojem „kabel“. Kabelem se dle [11] myslí:

Spojení jednoho nebo více elektrických, či optických vodičů v jeden celek se společným pláštěm sloužící k přenosu elektrické energie, dat, signálů, světla atp. Za kabel je považován i samostatný vodič s vlastní izolací.

Takový kabel je pak, jak citace uvádí, použit k různým účelům, např. audio kabel propojující přehrávač s reproduktorem nebo rozvodový kabel elektroinstalace. Tento fakt naznačuje, že lze kabely rozdělit do několika skupin [24, 3]:

- silové/silnoprůdné kabely
- slaboprůdné kabely
 - datové kabely
 - sdělovací kabely
 - ovládací kabely

Silové kabely se používají například pro rozvody elektrických instalací, jsou zpravidla větších průřezů, mají odlišné vlastnosti a musí být odolnější vůči vnitřním i vnějším vlivům. Primárně však tyto kabely nebudou předmětem této práce, a tak nebudou dále pro její účely brány v úvahu. Na co se naopak práce zaměří jsou slaboprůdné kabely, jež jsou ve velké míře používány v počítačových a komunikačních systémech a instalacích. Jejich úkolem je přenášet data nebo řídicí signály mezi zařízeními.

Ve složitějších systémech je takových kabelů k nalezení velké množství, proto je žádoucí, aby jejich vedení bylo pokud možno maximálně organizované. Běžně se tedy kabely skládají do větších celků právě za tímto účelem. V praxi se pro označení takovýchto svazků kabelů nebo vodičů obecně používají dva termíny [14].

Přes výraznou podobnost a fakt, že spolu tyto termíny opravdu souvisí a jsou běžně v cizojazyčné literatuře zaměňovány, jejich významy úplně totožné nejsou. Jedná se o:

- kabelový/vodičový svazek
- kabelová sestava

V následujících odstavcích budou popsány významy těchto dvou termínů podle [29, 6], včetně jejich zásadních rozdílů.

Kabelový svazek Kabelový svazek představuje kombinaci několika navzájem izolovaných kabelů, které jsou zafixovány jako celek, popř. jsou umístěny do celistvého pouzdra z izolantu. Toto pouzdro chrání kabelový svazek před vnějšími vlivy, např. před prachem nebo vlhkostí, a umožňuje uživateli manipulovat se svazkem jako s jediným celkem. Celistvé pouzdro však není nutností – fixaci kabelů svazku lze také realizovat např. stahovacími pásky („*zip-tie*“) nebo různými typy izolačních elektrikařských pásek. Samotné kabely použité ve svazku jsou většinou stejného typu a průřezu, cílem je vytvořit uspořádané a snadno analyzovatelné vedení. Kabelový svazek může být (a také zpravidla bývá) na některém svém konci zakončen určitým typem konektoru (do něhož jsou připojeny jednotlivé kabely), jak lze vidět na Obr. 1.1, nebo může být připojen do svorkovnice či jinak upevněn k dalšímu zařízení.



Obr. 1.1: Příklad kabelového svazku. Velký počet kabelů vedených ve společném pouzdře pro lepší manipulaci a organizaci vedení. Na konci jsou kabely vyvedeny z pouzder, odpláštěny a připojeny ke konektorům. Zdroj: <https://bit.ly/34Lg2pN> (cit. 28.10.2020)

Kabelová sestava Kabelová sestava je kombinace jednotlivých kabelů a kabelových svazků (i různých typů a určení) uspořádaná do jediného celku. Cílem takového uspořádání je získat vedení s vlastnostmi několika různých kabelových svazků, které je zároveň organizované a jednodušeji manipulovatelné. Jednotlivé kabely a svazky v sestavě jsou samostatně izolovány a fungují nezávisle na sobě, běžně jsou všechny zakončeny vlastním typem konektoru. Zpravidla je celá sestava obalena odolnou izolací, nebo jiným podobným pouzdem, jenž poskytuje nadstandardní ochranu proti vnějším vlivům a fixuje všechny složky sestavy. Kabelové sestavy jsou ve většině případů vyráběny pro určité účely, sestaveny speciálně pro konkrétní využití v konkrétní instalaci (např. letectví, automobilový průmysl, strojírenství). Typický příklad kabelové sestavy je vyobrazen na Obr. 1.2.



Obr. 1.2: Příklad kabelové sestavy. Jedná se o sloučení několika typů kabelových svazků s různými funkcemi. Celá kabelová sestava je poté určena k typickému použití, nebývá univerzální. Zdroj: <https://bit.ly/2KK6g0j> (cit. 28.10.2020)

Je tedy zřejmý rozdíl mezi kabelovými svazky a sestavami – kabelová sestava se skládá z různých kabelových svazků a dalších kabelů, je vyrobena pro konkrétní použití a je složitější na analýzu. Je také zpravidla robustnější a odolnější vůči poškození. Oproti tomu kabelový svazek je vytvářen jednoduše pouze za účelem organizace vedení. V dalších kapitolách se bude práce zaměřovat pouze na kabely a kabelové svazky, neboť ty jsou základy všech složitějších instalací.

Na závěr nutno upozornit, že utváření kabelových svazků se netýká pouze slaboproudých kabelů, nýbrž i silové kabely mohou tvořit svazky a sestavy. Na tyto však není práce zaměřena.

1.2 Charakteristické vlastnosti kabelů

Každý kabel má samozřejmě i své charakteristické vlastnosti, které je třeba uvažovat před jeho použitím. Právě v závislosti na plánovaném použití je třeba analyzovat faktory jako maximální možné proudové zatížení vodičů, materiál izolace a jiné fyzikální vlastnosti – např. ohebnost a pevnost. Tyto vlastnosti jsou zpravidla k nalezení v datasheetech výrobce nebo příslušných technických normách a jsou označeny jako charakteristické hodnoty:

- materiál vodiče,
- průřez kabelu,
- elektrický odpor,
- elektrická kapacita,
- elektrická indukčnost,
- izolační odpor,
- dielektrická pevnost izolace,
- počet žil,
- uspořádání žil,
- stínění,
- doporučené použití a
- další fyzikální vlastnosti.

Průřez a materiál kabelu udávají maximální proudové zatížení, které předurčuje způsob použití. Elektrická indukčnost, kapacita a odpor jsou považovány za parazitní vlastnosti kabelů (ideální by bylo tyto hodnoty minimalizovat), a ačkoliv jsou tyto hodnoty mnohdy zanedbávány, u různých aplikací je třeba jich uvažovat.

Kvůli jevu elektromagnetické indukce při vedení proudu dvěma souběžně taženými vodiči vzniká magnetické pole a v případě datových nebo signálových kabelů může vznikat elektromagnetické rušení (vzhledem k množství zdrojů i z okolí) [5]. Ve vícežilových kabelech je tedy důležité uspořádání žil a stínění, které účinky tohoto rušení do jisté míry tlumí. Nejběžnějším typem uspořádání je kroucení žil, čímž se vlivy elektromagnetické indukce mezi jednotlivými žilami drasticky sníží, ne-li úplně vyruší. Stíněním je, na druhou stranu, možné minimalizovat elektromagnetické rušení z okolí.

Neméně důležitými jsou vlastnosti izolací, které budou popsány v Podkap. 1.3. Tyto vlastnosti bohužel nejsou po celou dobu životnosti kabelu stálé, s časem a opotřebením se jejich kvalita zhoršuje. Jelikož kabelové svazky neumožňují zrovna jednoduchou kontrolu všech součástí, nabývají vlastnosti izolací na významu právě proto, že z velké části zajišťují správnou funkčnost celého kabelového vedení.

1.3 Testované vlastnosti kabelových svazků

Je pochopitelné, že se kabely spojují do svazků za nějakým účelem. Pokud tak však učiníme, není již dále možné uvažovat pouze vlastnosti pouze jednotlivých kabelů či vodičů, nýbrž je třeba brát v potaz také vlastnosti svazku jako celku. Jedná se především o ty vlastnosti, které zajišťují, aby se jednotlivé kabely ve svazku a jednotlivé žíly kabelu navzájem co možná nejméně ovlivňovaly a aby celý svazek fungoval tak, jako by byl každý kabel tažen zvlášť. K tomu má sloužit především dobrá izolace, jejíž stav však nemusí být vždy bezvadný.

Vlastnosti kabelů jako *průřez* nebo *počet žil* můžeme považovat za konstantní a v čase neměnné. Co se ale s časem mění, je kvalita a správná funkčnost kabelových izolací. Špatný stav izolace může způsobit zkrat, úraz elektrickým proudem, či dokonce požár. Proto je žádoucí její stav v pravidelných intervalech kontrolovat a testovat. Pokud by se uvažovalo, že je navíc každý kabel ve svazku zakončen konektorem, pak je třeba z výše uvedených vlastností (viz Podkap. 1.2) kontrolovat obzvláště [4]:

- izolační odpor,
- dielektrickou pevnost izolace,
- správné připojení ke konektorům.

Definice uvedených vlastností jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

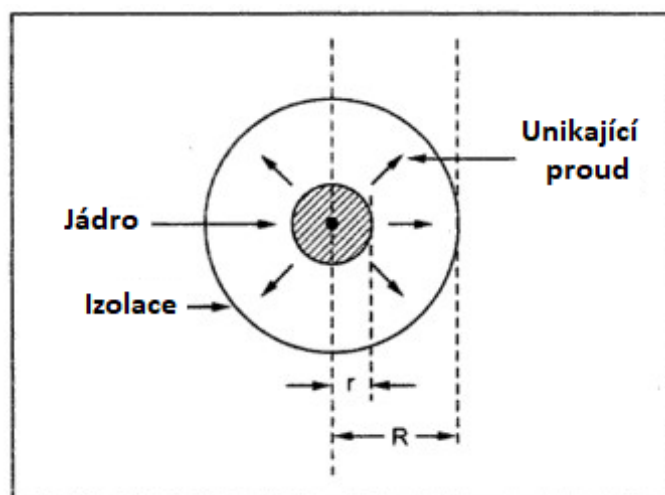
1.3.1 Izolační odpor

Aby se předešlo možným úrazům elektrickým proudem a dalším vlivům na okolní vedení, jsou všechny vodiče kabelů od okolí odděleny vrstvou elektrické izolace, která má za úkol bránit unikajícím proudům (viz Obr. 1.3). Síla (tloušťka) izolací závisí na účelu použití kabelu a na jeho designu. Izolace je vyráběna z dielektrika, a tudíž jí je možné přisoudit charakteristickou hodnotu elektrického odporu. Tento elektrický odpor, který brání unikajícím proudům, je nazýván *izolačním odporem* [20].

V kabelech a kabelových svazcích může být izolační odpor testován třemi přístupy v závislosti na bodu, vůči kterému je odpor měřen:

1. Vůči k potenciálu země v obvodu
2. Vůči k jiným žilám kabelu
3. Vůči k dalším bodům elektrické instalace

V praxi jsou však zpravidla všechny tyto relevantní body spojeny do jediného s tím, že se měřením určuje izolační odpor *vůči zbytku obvodu/vedení*. Požadované hodnoty jednotlivých měřených izolačních odporů se pak odvíjí od plánovaného použití a od požadavků plynoucích z instalace.



Obr. 1.3: Průřez kabelem s vyobrazením unikajících proudů. Izolace působí vůči těmto proudům jako izolační odpor. Hodnoty r a R označují poloměr vodiče, resp. celého kabelu i s izolací. Zdroj: [20]

1.3.2 Dielektrická pevnost

Izolace kabelu je, jak již bylo zmíněno, vyrobena z dielektrika. Dielektrikum je látka, jež má schopnost polarizace, tedy příslušné reakce na přiložené elektrické pole. Míra polarizace je závislá na velikosti intenzity vnějšího elektrického pole přivedeného k dielektriku. Pokud je intenzita takového přiloženého elektrického pole dostatečně vysoká, vazby v dielektriku se poruší, dochází k *dielektrickému průrazu* a materiál se rázem stává vodivým. V případě, že se jedná o pevné dielektrikum, může dojít k nevratnému mechanickému poškození. Tím by došlo k narušení izolace, což vede v určitých případech k úplné ztrátě její funkčnosti.

Dielektrická pevnost je, vzhledem k výše uvedenému, vlastnost dielektrika (izolace) definovaná jako velikost intenzity elektrického pole, při níž dochází k elektrickému průrazu. Jinými slovy ji lze popsat jako „odolnost materiálu vůči elektrickému poli“ [19].

1.3.3 Správnost propojení

Kabelový svazek může obsahovat velké množství kabelů, přičemž spojením do takového svazku většinou uživatel přijde o možnost jejich snadného vizuálního a jednoznačného rozlišení. Problém potom nastává, pokud je nutné konce kabelů opatřit konektory a kabel dále používat. Po jejich připojení a před prvním použitím je tedy žádoucí ověřit právě správnost jejich připojení (angl. „continuity test“), jinými slovy, že piny jednoho konektoru jsou vodivě spojeny s požadovanými piny konektoru na druhé straně kabelu.

Některá zapojení vyžadují křížení (např. UTP RJ-45), popřípadě obsahují odbočky; v případě konektorových redukcí jsou piny jednoho konektoru propojeny s odpovídajícími piny druhého konektoru pro zachování kompatibility. V těchto případech je téměř nutné správnost zapojení ověřit (mohly by nastat zkratky a poškození instalací).

1.3.4 Přechodový odpor

Tuto vlastnost je možné hledat především u kabelů opatřených konektory nebo upevněných ve svorkovnici. V místě, kde se dotýkají dva vodiče, vzniká *elektrický kontakt*. Skrze tento kontakt teče proud z jednoho vodiče do druhého. V místě spojení uvažujeme za normálních okolností minimální odpor. Problém však nastává, pokud je kabel chybně či nedokonale upevněn do konektoru nebo svorkovnice (například chybně provedeným krimpováním nebo neúplně dotažená svorka) [12].

Pak vzniká v místě spojení tzv. přechodový odpor, jenž lze definovat jako prudký nárůst elektrického odporu právě v místě vodivého spojení dvou vodičů. Ten může, ale nemusí být nežádoucí ¹. Pokud bude vodičem protékat proud o vyšších hodnotách, vyvolá v místě špatného kontaktu, vlivem právě přechodového odporu, nadměrné zahřívání až přehřátí. V určitých situacích a instalacích může toto přehřátí způsobit úraz elektrickým proudem, nebo dokonce požár.

Proudy, pro které jsou určeny kabely, jež řeší tato práce, však nedosahují takových hodnot, aby bylo měření této parazitní vlastnosti příkládán důraz. Dále se tedy práce nebude přechodovým odporem zabývat, zde je zmíněn pouze pro úplnost.

¹Zdroj dostupný z: <https://bit.ly/3eTxxbQ> (cit. 20.3.2021)

2 Vybrané testy kabelových svazků

Jak již bylo zmíněno, z důvodu zvýšení míry zjednodušení kabelového vedení a organizace kabelových svazků vyvstávají problémy v otázce detekce chyb či při jejich analyzování. Tomu rovněž přispívá fakt, že kabelové svazky se stávají čím dál komplikovanějšími a rozmanitějšími. Kabelové svazky je tedy třeba čím dál důsledněji testovat i jinými než jen vizuálními metodami. Vzhledem k jejich náročnosti a ceně je tak patrná snaha o zrychlení a zefektivnění testů a o jejich jednoduché přizpůsobení mnoha různým variantám kabelů. U toho je třeba dbát na bezpečnost pracovníků, již tyto testy provádí, a mnohdy také na vyvarování se provádění redundantních testů.

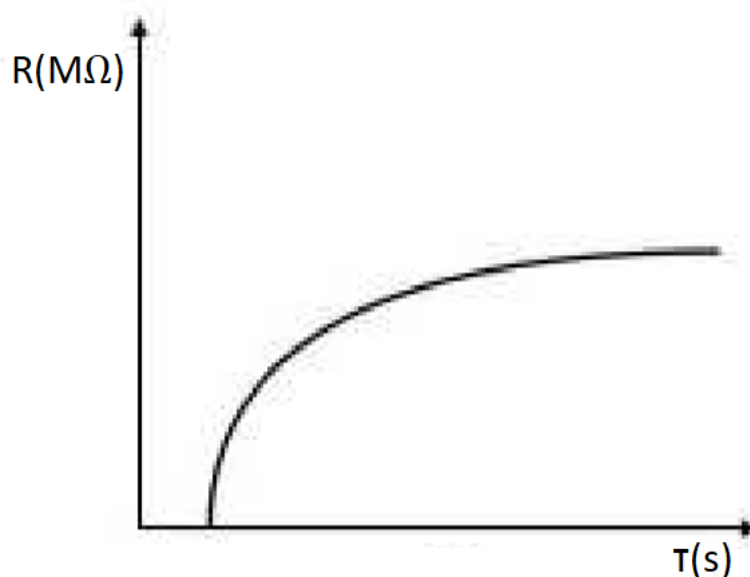
S ohledem na předchozí kapitolu připadají v úvahu právě testy izolačních odporů, kontinuity a dielektrické pevnosti. V této kapitole tedy budou popsány principy všech těchto zmíněných druhů testů, které budou následně uvažovány i při návrhu řešení praktické části této práce.

2.1 Princip testu izolačního odporu

Při měření izolačního odporu R_i je zjišťován aktuální stav izolace jednotlivých žil kabelu, každé vůči ostatním vodivým prvkům instalace a vůči zemi (zemnicí svorce). Je třeba jej měřit pravidelně, aby byla zajištěna bezpečnost a správná funkčnost celé kabeláže. Měří se za pomoci speciálního měřiče izolace.

Měřič izolačního odporu je označení pro speciálně konstruovaný ohmmetr schopný měření vysokých odporů za použití stejnosměrného napětí (zpravidla je schopen měřit řádově vyšší odpory za použití mnohem vyšších napětí, než kterých jsou schopné běžně používané ohmmetry). V tomto případě se používá napětí v rozsahu od desítek voltů po desítky kilovoltů, které musí být stabilní; měřené odpory se pohybují v řádech $M\Omega$ až $G\Omega$ v závislosti na předpokládaném použití kabelu. Během celého měření nesmí měřicí proud klesnout pod hodnotu 1 mA. [33, 25]

Měření samotné spočívá v přiložení měřicího napětí postupně na každou žílu kabelu a odečítání hodnoty izolačního odporu z displeje měřicího přístroje. Jelikož je měření závislé na podmínkách okolí (teplota, vlhkost...), přiloženém měřicím napětí a na době měření (viz Obr. 2.1), je třeba hodnoty odečítat až po dostatečně dlouhém čase, kdy dojde k jejich ustálení. Konkrétní metody měření a minimální přijatelné hodnoty izolačního odporu pro zaručení správné funkce a bezpečnosti jsou v závislosti na typu měřeného kabelu definovány v příslušných normách. [34]



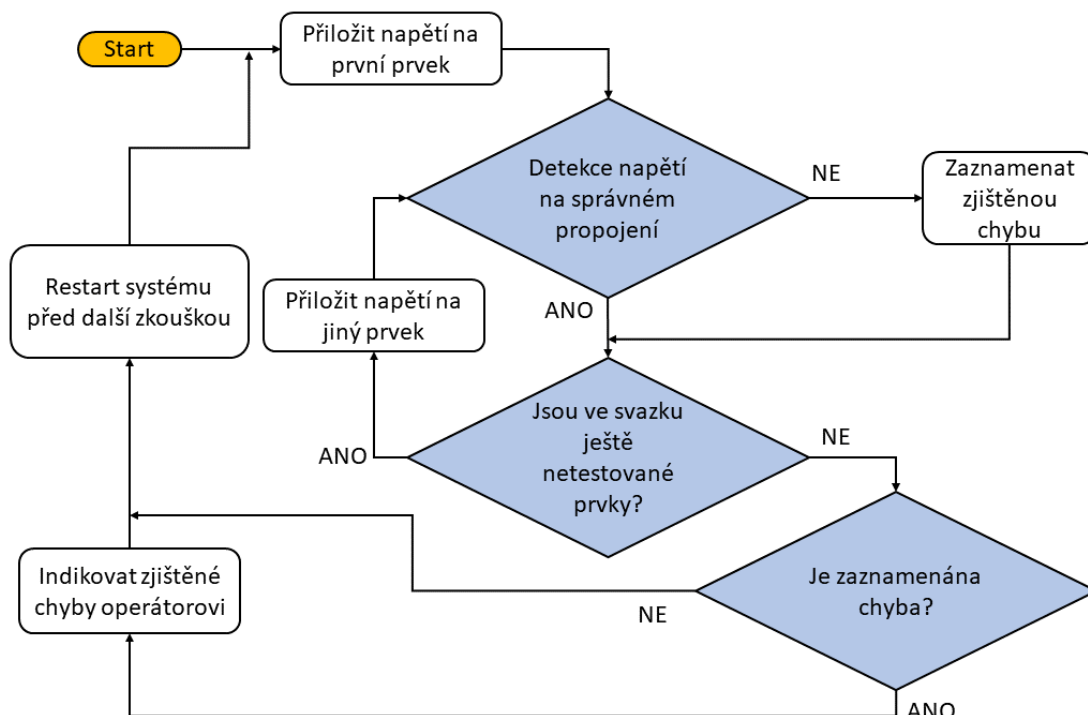
Obr. 2.1: Závislost odečítané hodnoty izolačního odporu na délce měření. Vždy je nutné odečítat hodnotu až po dostatečně dlouhém čase, kdy dojde k jejímu ustálení.
Zdroj: [25]

2.2 Princip testu správnosti propojení

Test správnosti připojení, též běžně nazývaný „testem kontinuity“, je prováděn za účelem ověření, že:

- všechny žíly kabelu jsou v celém svém průběhu vodivé,
- nedošlo k poškození uvnitř pláště,
- sled žil na koncích kabelu odpovídá požadovanému.

Test se provádí pomocí ohmmetru či měřiče izolace (nebo jiného přístroje pracujícím na podobném principu) tak, že se na obou stranách kabelu přikládá měřicí zařízení k jednotlivým žilám. V ideálním případě, kdy se jedná o vodivé spojení, je propojen měřicí obvod, jímž začne protékat proud, a toto propojení je indikováno (např. pomocí LED diod nebo bzučáku) a vyhodnoceno [25]. Pokud se jedná o kabelové svazky, je test kontinuity prováděn rovněž mezi všemi předpokládanými propojeními. Vývojový diagram celého procesu testování je vyobrazen na Obr. 2.2. Zkoušce správnosti propojení musí bezpodmínečně vyhovět každá žíla/kabel příslušného kabelu/kabelového svazku.



Obr. 2.2: Vývojový diagram demonstrující průběh procesu zkoušky kontinuity.
Zdroj: [4]

2.3 Princip testu dielektrické pevnosti

Zkouška dielektrické pevnosti izolačních materiálů je vysokonapětovou zkouškou, při níž se zjišťuje kvalita izolace a její odolnost vůči průrazům. Zkoumanou veličinou je zde elektrická pevnost, resp. průrazné napětí. Průrazné napětí je takové napětí, při kterém dochází v pevném dielektriku k průrazu, zahoření oblouku a u pevných dielektrik zpravidla k nevratné degradaci dielektrického materiálu. Pokud je známa velikost tohoto napětí, hodnota elektrické pevnosti se určí dle Rovnice 2.1 [38]:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad [\text{V/m}], \quad (2.1)$$

kde U_p je právě velikost průrazného napětí a d je tloušťka dielektrika (izolace).

Zkouška izolací probíhá v souladu s technickými normami [35, 37, 36], dle kterých je také vybrána metoda pro zvyšování napětí. Na dielektrikum je přiloženo napětí, které je postupně zvyšováno v závislosti na zvolené metodě až k hodnotám mnohonásobně převyšující napětí při běžném provozu. Zaznamenána je výsledná hodnota napětí, při které došlo k průrazu. V případě testování kabelů s daným typem izolace je na kabel přiloženo napětí, které je zvyšováno až po hodnoty, stanovené v normách kabelu jako takové, jež by izolace měla ustát v každém případě. Při samotné zkoušce

je měřen svodový proud a zkouška je zakončena úspěšně, pokud během ní nedošlo k průrazu izolace.

Test dielektrické pevnosti se nicméně řadí mezi vysokonapěťové zkoušky a nebude nadále předmětem této práce. Popsán zde byl pouze pro úplnost a zjevnou spojitost se zkouškami izolačního odporu.

2.4 Další požadavky na testování

Dříve probíhalo testování, z důvodu používání kabelových svazků o menších objemech, převážně ručně – bylo prováděno lidskými pracovníky. Lidské zdroje jsou však velmi nákladné a ve chvíli, kdy je potřeba testovat velké množství produktů, také extrémně pomalé; navíc je takové testování založeno na individuálním přístupu každého z operátorů. Proto je patrná snaha o efektivní připojení automatizovaného testovacího zařízení, které by celý proces urychlilo a zlevnilo.

Takový automatický systém by měl po připojení svazku a spuštění provést přednastavený test, porovnat naměřené hodnoty s nastavenými prahovými hodnotami a upozornit obsluhu pouze v případě, že je při testu detekována nějaká nesrovnalost. Kromě toho, systém by měl být postaven tak, aby minimalizoval opotřebení svazků a konektorů. Co se týče konektorů, systém by měl být co možná nejuniverzálnější. Z těchto informací je tedy možné vyvodit hlavní požadavky na obecný ideální automatizovaný testovací systém [4]:

- Detekce všech stanovených chyb a defektů, tj. defekty uvnitř svazků (poškození, křížení nebo záměna kabelů) nebo špatné či nedokonalé spojení (takové, které by způsobilo chyby při aplikaci).
- Zkrácení doby testování. Manuálně prováděný kompletní test jediného kabelového svazku může běžně trvat i několik minut. Cílem automatizace je tento čas minimalizovat, optimálně na dobu několika (maximálně desítek) sekund.
- Maximální univerzálnost v otázce připojení různých svazků. Ideálně by mělo být možné k systému připojit libovolný svazek s libovolným počtem kabelů s libovolnými konektory. V praxi je však tato podmínka samozřejmě nerealizovatelná. Očekává se ale, že připojení bude v rámci všech možností co nejvíce univerzální (pokud se nejedná o tester proprietárních svazků).
- Jednoduché nastavení testu. Testovací proces by měl být co nejintuitivnější, nastavitelný např. formou konfiguračního souboru pro program mikropočítače bez nutnosti zasahovat do programu samotného; minimalizace prostojů mezi testy.

Primárním cílem testovacího zařízení však zůstává první zmíněný bod – rychle identifikovat veškeré chyby a hazardy, které se ve svazku mohou vyskytovat, a upozornit na ně obsluhu.

3 Návrh kabelového testeru

V předcházejících kapitolách byly uvedeny teoretické poznatky potřebné ke zpracování praktické části této práce. Jednalo se o definici pojmů, vysvětlení termínů a popis principů některých zkoušek prováděných na kabelech a kabelových svazcích. V této kapitole budou provedeny analýza požadavků plynoucích ze zadání práce, průzkum trhu s existujícími a běžně dostupnými testovacími zařízeními a rovněž vlastní návrh samotného řešení praktické části.

3.1 Analýza požadavků

Výstupem této diplomové práce bude řešení prototypu testeru kabelů a kabelových svazků. Problém, jenž je nutné řešit, spočívá v kabelu či kabelovém svazku o velkém počtu prvků (kabelů), zpravidla zakončených konektory na všech svých koncích. Analýza správnosti propojení v takových svazcích může být manuálně prakticky nemožná, vizuální kontrola neefektivní, ba dokonce nepoužitelná. Problematické je rovněž zjišťování, zda nebyly některé kabely ve svém průběhu poškozeny a zda tedy není eventuálně narušena jejich bezpečnost nebo správná funkce. Cílem bude navrhnout automatický tester takových svazků umožňující uživateli jednoduše provést test kontinuity a zkoušku izolačního odporu mezi všemi jednotlivými prvky (piny).

V zadání je stanoveno, že by zařízení mělo být schopno testovat izolační odpor při maximálním stejnosměrném napětí 100 V. V ideálním případě by izolační odpor mezi jednotlivými prvky v celém svazku měl být nekonečný. Změření nekonečné hodnoty však není v praxi možné, proto je třeba určit prahovou hodnotu (threshold), která bude určovat hranici měřitelného odporu. Vzhledem k předpokládanému použití zařízení se jeví (i po konzultaci s vedoucím práce) jako dostatečné uvažovat threshold na hodnotě 10 M Ω . Všechny naměřené hodnoty vyšší, než tento threshold budou považovány za nekonečně velké. Pokud by měřený svazek měl v testu uspět, bude nutné, aby veškeré naměřené hodnoty izolačního odporu byly „nekonečné“, tedy vyšší než 10 M Ω .

Dalším požadavkem na navrhovaný hardware je možnost zkoušení kontinuity, tedy správnosti propojení na všech zakončeních kabelu nebo kabelového svazku. Dle zadání má tester měřit správnost propojení všech pinů při maximálním testovacím proudu 1 mA. V návrhu je nutné zohlednit omezení proudu na maximálně tuto úroveň – pro tento účel se nabízí použití proudového zdroje. Měřený kabel v testu uspěje, pokud bude výsledná indikace propojení shodná s předpoklady stanovenými v testovacím předpisu.

Tester musí být schopen měřit alespoň 16-prvkové svazky, bylo by však vhodné se při návrhu zaměřit na modularitu zařízení, a tudíž snadnou rozšiřitelnost měřících

kapacit. V budoucnu se očekává, že tester bude měřit i 60 až 120 prvků ve svazku. Rozšiřitelnost by měla spočívat v jednoduchém připojení rozšiřujícího modulu, který navýší počet možných testovacích bodů.

Následně, po vypracování návrhu, bude zařízení realizováno na plošném spoji a celý proces testování bude řízen mikropočítačem nebo mikrokontrolérem. Zadání počítá s vytvořením ovládacího software, jehož podstatou bude provedení jednoduchého „pass/fail“ testu, který porovná naměřené hodnoty s předepsanými parametry (jednoduše modifikovatelný textový soubor v definovaném formátu).

Přestože se u některých kabelů běžně zkouší i dielektrická pevnost izolace (viz Podkap. 2.3), výsledný tester tuto vlastnost zkoušet nebude. Je to z důvodu, že se jedná o vysokonapěťovou zkoušku, kterou není v oblasti, kde bude zařízení provozováno, nutné provádět.

3.2 Průzkum trhu

V souladu s požadavky zadání byl proveden průzkum trhu s existujícími testery kabelových svazků, při kterém byl kladen důraz na zkoušky správnosti propojení a zkoušky izolačního odporu. Byla vypracována rešerše v současnosti dostupných měřicích zařízení. U všech níže zmíněných testerů byla ověřena dostupnost požadovaných měření, možnost automatizace a rozšiřitelnost; pro zajímavost jsou v textu uvedena i další podporovaná měření jiných vlastností a také cena (pokud bylo možné ji zjistit bez nutnosti poptávky).

3.2.1 Sefelec Synor 5000

Francouzská firma Sefelec, která od roku 2013 patří do skupiny Eaton, je předním výrobcem bezpečnostních testovacích zařízení a kabelových testerů. V jejich nabídce je možné najít různá zařízení, od mikroohmmetrů přes bezpečnostní testery unikačních proudů až po vysokonapěťové zdroje a testery. Zaměřují se převážně právě na testování kabelů a kabelových svazků. [21]

Vybraná zařízení ze série *Sefelec Synor 5000* jsou kompaktní vysokonapěťové testery kabelů a kabelových svazků nabízející možnost rozšiřitelnosti až na statisíce testovacích bodů. Jedná se velmi multifunkční testery. Nabízejí AC i DC testy dielektrické pevnosti v rozsazích až do 5.5 kV_{DC} a až 4 kV_{AC} napětí, dále testování komponent jako diod, rezistorů a kondenzátorů a také zkoušky stínění a kroucených párů. Pro požadované měření izolačního odporu testery podporují napětí o hodnotách až 2121 V a jsou schopny změřit hodnoty odporů v rozmezí $50\text{ k}\Omega$ až $5\text{ G}\Omega$ s přesností $5 - 15\%$. Test správnosti propojení je dostupný v režimech jak 2-vodičového,



Obr. 3.1: Tester kabelových svazků Sefelec Synor 5000P. Zdroj: [10]

tak i 4-vodičového měření s přesností 2 % za použití testovacího proudu v rozsahu $25 \mu\text{A} - 2 \text{ A}$. [22]

Model Synor 5000P (viz obr. 3.1) nabízí vysokou variabilitu připojení, kompatibilitu a rovněž možnost automatizace a dálkového centrálního ovládání pomocí PLC, přes síť nebo manuálně. Cena jednoho testeru se pohybuje okolo \$ 9 000.

3.2.2 Cirris CH2

Firma Cirris působí na poli produkce jednoduše použitelných testerů kabelů a kabelových svazků od roku 1984. V dnešní době využívá testery této společnosti k zajištění kvality svých kabelů, kabelových svazků, konektorů a dalších elektrických instalací mnoho firem po celém světě. Společnost nabízí produktové řady od jednoduchých testerů pro rychlé orientační zkoušky až po vysokonapěťová, automatizovaná zařízení s mnoha funkcemi. [31, 7]

Cirris CH2 (viz Obr. 3.2) je nejprodávanějším modelem z nabízených testerů této firmy. Jedná se o vysoce multifunkční zařízení schopné rozšíření až na 100 000 testovacích bodů. Nabízí testování jednotlivých komponent elektrických obvodů (diody, rezistory, kondenzátory) a testování správnosti párování u kabelů s kroucenými páry. Zařízení podporuje vysokonapěťové testy, včetně zkoušení dielektrické pevnosti (AC i DC) s rozsahy až 1.5 kV_{DC} a 1070 V_{AC} . Z požadovaných testů nabízí 2-vodičové i 4-vodičové režimy testování správnosti propojení při maximálním napětí 2.5 V a s testovacím proudem $1 \mu\text{A}$ až 10 mA , resp. $2 \mu\text{A}$ až 2 A . Zkoušku izolačního odporu je možné provádět s nastavitelným napětím až po 1500 V , přičemž je přístroj schopen měřit hodnoty až do $1000 \text{ M}\Omega$ s přesností 10 %. [8]

CH2 je automatizovatelný tester s podporou OS Windows a síťovým ovládáním pomocí software Easy-wire. Cenu bohužel není možné zjistit bez zadání poptávky firmě, předpokládá se ovšem, že je podobná konkurenčním výrobkům podobné třídy použití.



Obr. 3.2: Tester kabelových svazků Cyrris Systems CH2. Zdroj: [7]

3.2.3 Weetech W 434

Německá firma WEETECH působí na trhu již více než 45 let. Vyvíjí, produkuje a dodává testovací systémy pro kabely, plošné spoje a elektronické komponenty. Firma se zaměřuje na modulární rozšiřitelné architektury s velkými možnostmi kombinování pro co nejlepší naplnění aktuálních potřeb testování.[28]

Model W434 (viz Obr. 3.3) představuje kompaktní vysokonapěťový modulární tester s až 64 testovacími body, přičemž je ale možné systém rozšířit až na 6656 testovacích bodů. Výrobcem je u tohoto modelu garantována hardwarová kompatibilita i do budoucnosti. W434 nabízí testování přepínačů (tlačítka, relé...), elektronických komponent (rezistory, kondenzátory, diody, cívky). Přístroj je rovněž možné použít pro zkoušku dielektrické pevnosti s použitím vestavěných napěťových zdrojů až $1500 V_{DC}$ nebo $1060 V_{AC}$. Stejných zdrojů se využije i pro požadovaný test izolačního odporu, který je možné provádět v rozsahu až do $10 G\Omega$. Test kontinuity je k dispozici ve 4-vodičovém režimu s nastavitelným testovacím proudem až do velikosti 1 A. [27, 28]

3.2.4 Dynalab NX Hipot

Dynalab je americká firma, která se zaměřuje na výrobu testovacích zařízení výhradně pro kabelové svazky. Jedná se o designová kompaktní zařízení s širokou ob-



Obr. 3.3: Tester kabelových svazků WEETECH W 434. Zdroj: [28]



Obr. 3.4: Tester kabelových svazků DYNALAB NX Hipot. Pohled z přední a zadní strany. Zdroj: [9]

lastí použití, která jsou údajně zároveň cenově dostupná².

Vybraný model NX Hipot (viz Obr. 3.4) je nejrozšířenějším testerem vyráběným touto společností; je kompaktní, lehký a přenosný. Nevýhodou kompaktnosti je možnost připojení „maximálně“ 128 testovacích bodů. Nabízí testování běžných elektronických komponent (rezistorů, diod, kondenzátorů, relé) a vysokonapěťové testy dielektrické pevnosti s maximálním testovacím napětím 1.5 kV_{DC} nebo 1 kV_{AC} . Zkoušku kontinuity je možné provést pouze ve 4-vodičovém režimu zapojení, při níž je použit testovací proud maximálně 5 mA. Samozřejmostí je testování izolačního odporu až do hodnoty $1\text{ G}\Omega$ s přesností 10 %. [9]

Inzerované rychlosti testování se pohybují od 1 do 9 sekund při běžných tes-

²Cena modelu NX Hipot se v roce 2012 pohybovala kolem \$ 3700. Zdroj: <https://bit.ly/2KLT1uY> (cit. 28.12.2020).

tech. Nabízí možnost uložení testovacích programů pro opakované použití a je plně automatizovatelný skrze RS-232 nebo síťové rozhraní.

3.2.5 Adaptronic KT 638

Původní německá společnost Adaptronic Prüftechnik GmbH je další z předních výrobců testovacích zařízení a systémů. Navrhuje a dodává kvalitní řešení přizpůsobené konkrétnímu požadovanému případu použití při zkoušení v oblastech automobilového průmyslu, letectví, automatizace a mnoho dalších. Firma Adaptronic se zaměřuje pouze na testování kabelů a kabelových svazků. [1]

Malý a přenosný tester s LCD displejem (na Obr. 3.5), označený jako *KT 638-3*, je jednoduše modulárně rozšiřitelný, a tak nabízí uživateli až 512 testovacích bodů. Je možné jej připojit k automatizační technice skrze sériové rozhraní RS-232 nebo další síťové porty či USB porty. Jedná se o jednoduchý tester, který umožňuje testování komponent (rezistory, různé typy diod a kondenzátory), vysokonapěťové testování izolačního odporu při stejnosměrném napětí až $1500 V_{DC}$ v rozsahu až $2 G\Omega$ (v určitých případech $10 G\Omega$) a zkoušky kontinuity při velkých proudech až $2 A_{DC}$. Tento konkrétní tester oproti ostatním, dříve zmíněným, neumožňuje testovat dielektrickou pevnost. [2]

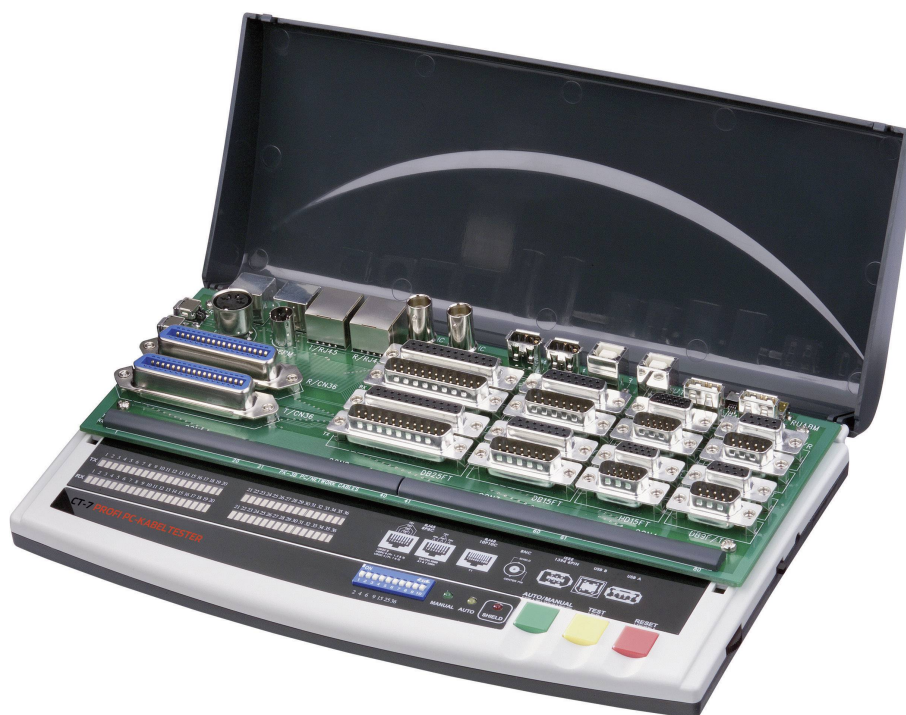
3.2.6 Voltcraft CT-7

Posledním z vybraných, dostupných testerů je model CT-7 od německé společnosti Voltcraft (obr. 3.6). Jedná se o manuální tester (lze jej však ovládat skrze RS-232) nabízející připojení kabelových svazků a kabelů s až 192 prvky, a to, bohužel, pouze skrze běžně používané průmyslové konektory. Výrobce však na tuto nevýhodu reaguje poskytnutím adaptérů na téměř libovolné konektory. Zařízení CT-7 je vybaveno



Obr. 3.5: Tester kabelových svazků Adaptronic KT 638-3, kompaktní verze modelu. Zdroj: [2]

funkcionalitou pouze pro identifikaci a správnost zapojení jednotlivých vodičů, testování přerušení a zkratů. Výsledky testů jsou indikovány pomocí LED diod. [26]



Obr. 3.6: Tester kabelových svazků Voltcraft CT-7. Hlavní panel obsahuje velké množství běžně používaných průmyslových konektorů a indikační LED diody pro demonstraci výsledků zkoušek. Zdroj: [26]

Jednoduchý tester bez dalšího rozšíření použitelný v podstatě pouze pro běžné rychlé testy. Nenabízí možnost testování izolačního odporu ani jiné vysokonapěťové testy. Z hlediska funkčnosti je však pravděpodobně nejjednodušší, čemuž odpovídá i deklarovaná cena € 305. Ideově je tento tester nejbližší požadovanému výstupu této práce.

3.3 Návrh vlastního řešení

Po analýze požadavků a zmonitorování trhu s nabízenými testery kabelových svazků je možné se přesunout k návrhu vlastního řešení konkrétního zadání. Zhodnocení dosavadních poznatků vede k rozdělení řešení na tři bloky:

1. Zdroj stejnosměrného napětí 100 V
2. Odporový člen pro omezení procházejícího proudu na 1 mA
3. Vícekanálový přepínač (16 testovaných prvků).

Jelikož bude ve výsledku celý systém řízený přes mikropočítač (pravděpodobně Raspberry Pi, toto bude předmětem řešení dále v práci), který vyžaduje pro napájení jiné napětí než samotný měřicí obvod, vyvstává problém více napájecích zdrojů. Aby bylo dosaženo maximálního možného zjednodušení, nabízí se možnost použití jediného zdroje napájení pro celé zařízení a současného využití DC/DC měničů pro získání potřebných napájecích napětí jednak pro tento počítač, jednak pro napájení testovacího obvodu. Detailněji bude tato problematika diskutována v Podkap. 3.3.1.

Odporový člen omezující hodnotu měřicího proudu bude ideálně umístěn do série s výstupem zdroje měřicího napětí 100 V. Jednoduchým výpočtem podle Ohmova zákona lze zjistit, že tak bude proud procházející měřicím obvodem omezen na maximální hodnotu danou zadáním 1 mA. Zároveň bude možné k tomuto odporu připojit analogově-digitální převodník, jenž bude pomocí některé z podporovaných sběrnic připojen k mikropočítači. Pomocí tohoto převodníku budou odečítány hodnoty napětí, které na základě stanoveného programového výpočtu poslouží k určení izolačních odporů vůči ostatním prvkům měřeného kabelu. Tímto bodem se bude práce zabývat v Podkap. 3.3.2.

Pravděpodobně nejdůležitějším bodem celého návrhu řešení pak bude zmíněný vícekanálový přepínač. Vzhledem k požadavku na modularitu a rozšiřitelnost, přičemž není kladen velký důraz na rychlost měření, bude hlavním požadavkem na navržený obvod jeho velikost. Celý navržený obvod by měl být dostatečně malý, aby bylo možné jej vnést na DPS, nebo i na nepájivé pole. Z tohoto důvodu není vhodné použít pro přepínání kanálů relé, která mají zpravidla velké rozměry. Namísto relé se však nabízí použití technologií MOSFET tranzistorů, konkrétně technologií *low-side přepínačů* a *high-side přepínačů*. V tomto zapojení bude třeba zajistit správné spínání a definovat napěťové hladiny pro sepnutý/rozepnutý stav (především u high-side přepínače). Řešením tohoto požadavku se bude zabývat Podkap. 3.3.3.

3.3.1 Zdroje napájecího a měřicího napětí

Ve výsledném obvodu bude potřeba zajistit několik různých napájecích napětí. Jelikož však mezi požadavky řešení patří minimalizace obvodu, použití několika externích napájení je krajně nepraktické. Pro tuto možnost by se muselo zakomponovat do spoje několik různých konektorů, z nichž každý by byl připojený k jinému zdroji – adaptéru. Rozměry těchto konektorů by navíc značně zvýšily požadavky na výsledný spoj a byly by na sobě nezávislé. Použití jediného zdroje napájení naopak umožní redukci rozměrů, při současném použití DC/DC měničů také stanovit závislosti jednoho napětí na druhém.

Výsledný obvod bude vyžadovat tři různá napájecí napětí:

1. měřicí napětí maximálně 100 V

2. napájecí napětí pro řídicí část 5 V

3. napětí o hodnotu $U_{GS_{th}}$ nižší než 100 V pro spínače (viz Podkap. 3.3.3)

Dále se tedy předpokládá využití síťového napětí, tzn. síťového adaptéru. Aby se zajistil dostatečný výkon pro všechny části obvodu (není zcela jasný výsledný proudový odběr), bude pro napájení obvodu použit napájecí adaptér s výstupním napětím 12 V. Nabízí se zde sice možnost využití adaptéru s jmenovitým výstupem 5 V, čímž by došlo k dalšímu snížení prostorových nároků (jeden DC/DC step down měnič 12 V \rightarrow 5 V), avšak není jisté, zda by byl výstupní výkon dostačující pro ostatní aktivní prvky v obvodu. Jedná se tedy o zajištění správné funkcionality na úkor potřebného prostoru.

Návrh tedy bude pracovat s použitím třech DC/DC měničů, každým pro jmenovité vstupní napětí 12 V a individuálně se jmenovitými výstupními napětími:

- 100 V,
- 5 V a
- 3 V až 5 V,

přičemž hodnota posledního jmenovaného bude záviset na deklarované hodnotě prahového napětí použitého tranzistoru.

3.3.2 Omezení a detekce měřicího proudu

Zadání udává maximální měřicí proud, jenž může měřicím obvodem protékat. Ten je stanoven na hodnotu $I_{max} = 1$ mA. Uvažuje-li se tedy maximální hodnota měřicího napětí $U_{max} = 100$ V, pak je použitím Ohmova zákona (viz Rovnice 3.1) vypočtena hodnota minimálního odporu potřebného k zajištění zmíněné podmínky.

$$R_{min} = \frac{U_{max}}{I_{max}} = \frac{100}{0.001} = 100 \text{ k}\Omega \quad (3.1)$$

Použití sériového pevného rezistoru s odporem o hodnotě 100 k Ω tedy zajistí, že měřicí proud nebude vyšší, než je jeho povolená hodnota, ani v případě zkratu v měřicím obvodu.

Zároveň se také tento rezistor nabízí jako pravděpodobně poslední pevný bod obvodu, který je možné použít pro měření požadovaných veličin. Ve chvíli, kdy budou testovány dva nezávislé prvky kabelu, bude měřicí část obvodu oddělena od potenciálu země velkou impedancí, tedy tímto rezistorem bude protékat pouze zanedbatelný unikající proud. Naopak, když dojde k vodivému spojení obvodu v důsledku testování dvou závislých prvků, dojde ke zkratu a rezistorem bude protékat téměř maximální proud (lze počítat s jistými odporovými ztrátami v dalších částech obvodu). V případě, že mezi měřenými prvky dojde k závažnějším defektům, poroste i hodnota unikajícího proudu a poroste i úbytek napětí na tomto rezistoru.

Pro detekci tohoto proudu se využije analogově-digitálního převodníku (dále jen „AD převodník“) připojeného sběrnici k řídicí části obvodu. Nastavení prahových hodnot a převodních parametrů AD převodníku proběhne pravděpodobně experimentálně poté, co bude obvod zprovozněn a budou známy konkrétní hodnoty. Současně se také počítá s nutností využít odporového děliče napětí, neboť citlivý integrovaný obvod, kterým AD převodník bezpochyby je, pravděpodobně nebude možné zapojit ke dvěma bodům obvodu s rozdílem potenciálů až 100 V. Samotnému zapojení se bude věnovat Podkap. 4.3.

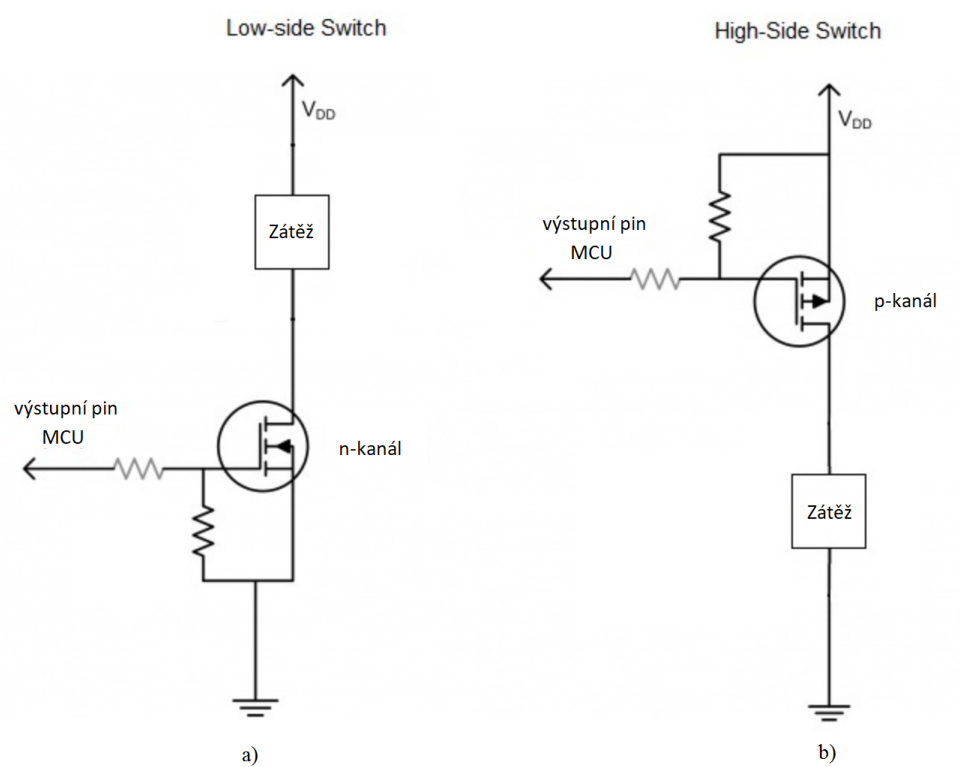
3.3.3 Technologie vícekanálového přepínače

Celý mechanismus desky s vícekanálovým přepínačem (switch) bude založen na principu low-side a high-side MOSFET switchů. Velikost MOSFET tranzistorů umožní minimalizovat plochu výsledné desky plošného spoje, jejich výměna při poruše je výrazně snazší a rovněž jejich cenám nemohou běžná elektromagnetická relé konkurovat. Je navíc možné při nákupu komponentů využít možností tranzistorových polí, díky čemuž se značně zredukuje množství použitých součástek a celý spoj bude přehlednější. V následujících odstavcích jsou dále vysvětleny principy zapojení N- a P-kanálových MOSFET tranzistorů tak, jak budou využity ve výsledném obvodu.

Low-side přepínač

V řešení této práce bude jako low-side switch použit MOSFET tranzistor s kanálem typu N v zapojení podle Obr. 3.7a. V tomto zapojení se N-FET používá k připojení zátěže k části obvodu na nízkém potenciálu (potenciálu země). Hradlo **G** je ve stavu „zavřeno“ na stejném potenciálu jako elektroda **S** (source), tedy v tomto případě na potenciálu země. Pokud je žádoucí změnit stav přepínače (otevřít kanál tranzistoru), je třeba na hradlo připojit minimálně takové kladné napětí (vyšší než napětí na elektrodě S), které dokáže otevřít kanál tranzistoru (prahové napětí, tzv. „Threshold Voltage $U_{GS_{th}}$ “). Velikost tohoto napětí se liší v závislosti na použitém modelu tranzistoru, hodnoty $U_{GS_{th}}$ lze najít v datasheetech výrobců použitých součástek. Pokud je na hradlo přivedeno minimálně napětí $U_{GS_{th}}$, vytvoří se vodivý kanál a switch se přepne do stavu „otevřeno“. Smyčka spínaného obvodu je tímto uzavřena a zátěž je připojena k nízkému potenciálu.

Jelikož bude ve výsledném obvodu elektroda S tohoto typu přepínače připojena k potenciálu země, bude možné pro spínací napětí využít zdroje napětí pro napájení mikropočítače (viz Podkap. 3.3.1). Napětí na výstupu tohoto zdroje vůči potenciálu země bude dostatečně vysoké, aby překonalo prahové napětí tranzistoru a aby se jeho kanál otevřel.



Obr. 3.7: Schéma zapojení MOSFET tranzistorů jako low-side (a) a high-side (b) přepínačů. Zdroj: <https://bit.ly/2X9WCXi>

High-side přepínač

Oproti low-side přepínači se high-side přepínač používá k připojení zátěže k vyššímu potenciálu. V řešení této práce bude použit P-FET, jenž bude vykonávat právě funkci tohoto typu přepínače (viz Obr. 3.7b). Ten funguje na principu toho, že hradlo je ve stavu „zavřeno“ připojeno na stejný potenciál jako elektroda **S**, tedy k vyššímu potenciálu. Pro otevření kanálu tranzistoru je nutné připojit na hradlo potenciál o minimálně prahové napětí $U_{GS_{th}}$ nižší. Opět, typické hodnoty tohoto napětí se liší v závislosti na použitém modelu a jsou k nalezení v datasheetech výrobců. Pokud je hradlo připojeno k tomuto potenciálu, switch změní stav na „otevřeno“, vytvoří se vodivý kanál, smyčka spínaného obvodu je uzavřena a zátěž je připojena k vysokému potenciálu.

Narozdíl od low-side přepínače je zde pro otevření kanálu potřeba napětí nižší než spínané. Pokud budeme uvažovat spínané napětí dané zadáním (100 V), bude potřeba zajistit i zdroj takového napětí, jehož hodnota bude „plavat“ minimálně o hodnotu prahového napětí pod spínaným. Zde se nabízí použití DC/DC měniče (viz Podkap. 3.3.1), jenž bude kladným pólem svého výstupu spojen ke spínanému napětí, přičemž na jeho záporném pólu bude o jmenovité napětí nižší hodnota. Samotný tranzistor pak bude buzen tímto napětím. Ke zdrojům a měničům napětí, zmíněným v Podkap. 3.3.1, tedy přibude další za tímto účelem.

Umístění a měření samotného kabelového svazku

Když je navržena struktura obvodu přepínačů, chybí zakomponování měřeného kabelového svazku. Jak při měření kontinuity, tak i při měření izolačního odporu je možné o kabelovém svazku uvažovat jako o zátěži. Reálně se pro označení testovaných prvků častěji používá anglická zkratka DUT, tedy *Device Under Test*. Jeho připojení bude realizováno mezi výše zmíněné low-side a high-side přepínače. Každý kabel svazku se na jednom svém konci připojí na elektrodu **D** (drain) jednoho high-side, druhým koncem pak na stejnou elektrodu low-side přepínače. Testování proběhne podle vývojového diagramu (viz Obr. 2.2), přičemž bude detekován proud na vstupním sériovém rezistoru.

Reálně mohou být změřeny tři typy hodnot:

1. hodnota indikující kontinuitu měřeného prvku,
2. hodnota indikující nekonečný izolační odpor měřených, prvků
3. jakákoliv jiná hodnota v rozmezí předchozích zmíněných.

V prvním případě se jedná o stav, kdy jsou sepnuty dva přepínače mezi sebou spojené jedním kabelem svazku. Je detekováno propojení a případně se ověří, že pro oba kabely z daného páru je indikováno pouze jediné propojení. Druhý případ značí stav, kdy jsou měřeny dva různé kabely, které se navíc navzájem neovlivňují. Systém

zaznamená „nekonečný“ izolační odpor. Pokud však nastane poslední případ, systém musí indikovat nižší hodnotu izolačního odporu na některých žilách svazku. Je důležité zmínit, že tato situace nemusí nutně znamenat špatný stav izolace. Některé technické normy uvádí výrazně nižší hodnoty izolačního odporu jako dostačující (například $R_i \geq 1 \text{ M}\Omega$) [32]. Zpracování výsledku nicméně proběhne podle daného předpisu. Samozřejmě bude také potřeba uvažovat jistou odchylku měření.

3.3.4 Návrh dalších částí obvodu

Výše uvedené části tvoří základní funkcionalitu celého výsledného řešení. Kromě nich je třeba navrhnout i další parametry, mezi něž se řadí například:

- způsob buzení jednotlivých spínačů,
- prvky indukující správnou funkci (pro odladění),
- způsob realizace na plošných spojích.

Na tyto se zaměří následující odstavce.

Buzení jednotlivých spínačů

Aby bylo možné spínat a rozepínat jednotlivé spínače, je nutné navrhnout způsob, kterým bude probíhat buzení jejich hradel. Kvůli požadavku na jednoduchost a rozšiřitelnost není vhodné využít například procesoru, nebo jiné složitě programovatelné komponenty. Je tomu tak proto, že v případě dalšího rozšíření maximálního počtu měřených kanálů by bylo nutné upravit software, který definuje a řídí průběh měření. Pro tyto účely je tudíž třeba využít jiného způsobu buzení.

Ideální komponentou pro tyto účely je posuvný registr. Pomocí synchronní sběrnice je možné v přesně definovaných intervalech spínat jednotlivé výstupy postupně, přičemž není potřebná úprava softwaru v případě rozšíření. Spínání přitom probíhá tak, že registr definované výstupy připojí buď na potenciál svého napájecího vstupu, nebo svého zemního vstupu. Této skutečnosti lze tedy u MOSFET tranzistorů (jsou spínané napětím) dobře využít. Posuvné registry se navíc dají jednoduše řetězit a jsou schopné jednoduše poskytovat zpětnou vazbu skrze zmíněnou sběrnici. Jejich cena je navíc zanedbatelná, ve srovnání s cenou procesoru. V případě této diplomové práce bude potřeba 2-krát 16 bitů výstupu, jeden bit pro každý přepínač každého kanálu.

Použití posuvného registru pro high-side přepínače v tomto zapojení je však limitováno provozním napětím mikropočítače. Ten pracuje s napájecím napětím 5 V, a není proto možné, aby řídil budič na vyšších napětových úrovních. Pro správnou funkci bude nutné řídicí signály high-side registrů galvanicky oddělit a přenést na úroveň definovanou jejich napájením (v tomto případě 100 V). Požadovanou funkci by měly zajistit *optočleny*.

U registrů budičích low-side přepínače nebude optické oddělení potřeba, spínají zátěž k potenciálu země, tudíž zde nenastane nebezpečný rozdíl potenciálu. Tyto registry tak mohou být napájeny ze stejného zdroje jako řídicí obvod a řízeny přímo z mikropočítače.

Indikace správné funkce

Pro účely zajištění jednoduššího testování a indikace správné funkce jednotlivých částí měřicího obvodu by bylo rozumné implementovat i uživatelskou zpětnou vazbu. Ta by měla spočívat v tom, že při sepnutí či rozepnutí jednotlivých spínačů bude uživateli nějakým způsobem prezentován jejich aktuální stav. Co se týče ostatních částí obvodu, jejichž primární funkcí je především napájení, rovněž by měl uživatel mít možnost jejich funkčnost ověřit. Úkolem tohoto odstavce je určit ideální formu obou typů zpětné vazby.

Nejpřirozenějším typem uživatelské zpětné vazby je vizuální indikace stavu. Ta může být jednoduše zajištěna použitím zdroje světla, jehož stav reprezentuje binární stav „zapnuto/vypnuto“. Kvůli požadavku na rozměry se nabízí použít LED diod malých rozměrů. Co se týče spínačového obvodu, zde budou LED diody výbornou volbou, neboť v době, kdy probíhá test, se uživatel jednoduše přesvědčí, který prvek kabelu (resp. který kanál) je právě testován. Uživatel navíc nebude muset používat žádné externí zařízení. Každému tranzistoru ve spínačovém obvodu tak bude přiřazena LED dioda (pravděpodobně také s omezovacím rezistorem v závislosti na konkrétním typu diody). Nebude třeba žádného software pro ovládání, neboť ve chvíli, kdy se na hradle daného tranzistoru připne napětí pro jeho otevření, začne protékat proud i diodou a ta se automaticky rozsvítí. Když se kanál tranzistoru zavře, dioda svítit přestane.

Mohlo by se zdát, že indikace funkčnosti pomocí LED diod by byla ideální i pro ostatní, napájecí části obvodu. Pokud se však vezme v úvahu, že všechna napětí jsou vztažena k jedinému bodu, pak rozdíl potenciálů může nabývat hodnoty až 100 V. Takové napětí není pro LED diody použitelné a muselo by se pravděpodobně použít rozměrnějších výkonových rezistorů pro vytvoření dostatečně velkého ztrátového výkonu, aby se dioda nepřetížila. Mnohem jednodušší bude v tomto případě využít možnosti plošného spoje a vytvořit *testovací body*, tzv. „test-pointy“, na které může uživatel přiložit sondy běžného voltmetru, a spolehlivě si tak ověřit přítomnost správného napětí na všech napájecích linkách. Toto řešení je také jednodušší z toho důvodu, že uživatel reálně nemá potřebu ověřovat funkčnost napájení při každém (například opakovaném) použití.

V poslední řadě je pak zajištění zpětné vazby od řídicího členu. Jelikož je plánováno použití komerčního řešení (např. Raspberry Pi), předpokládá se, že indikace

zapnutí bude již zabudována přímo na desce mikropočítače, a není tedy nutné užití dalších redundantních částí.

Realizace na plošných spojích

Než započne návrh samotného obvodu a následně i plošného spoje, je nutné rozhodnout o přibližném rozdělení jednotlivých částí. Vzhledem k požadavkům plynoucím z Podkap. 3.1, kde je patrný důraz na modularitu a rozšiřitelnost, se vskutku jedná o důležité rozhodnutí.

Rozšiřitelnost celého zařízení má spočívat v možnosti testování kabelů o větším množství prvků, přičemž v základní verzi musí těchto testovaných prvků podporovat alespoň 16. Umístění samotného testovaného kabelu bylo podle předchozí podkapitoly navrženo mezi low-side a high-side přepínače pro jednotlivé kanály. Těchto kanálů bude tedy bezpochyby zapotřebí alespoň 16. Je třeba si uvědomit, že spínané napětí všech kanálů je společné. S každým kanálem jsou pak spjaty budiče (posuvné registry), jež zajišťují správné sepnutí konkrétních spínačů. Každému jednotlivému spínači – tranzistoru také přísluší LED dioda, která indikuje jeho aktivní nebo pasivní stav, tedy stav sepnuto / rozepnuto. Všechny tyto součásti jsou pro každý kanál jedinečné a nelze je řadit ke společným částem obvodu (kromě zmíněného spínaného napětí).

Pro rozšíření testovacích možností a navýšení počtu kanálů přepínače tedy bude nutné replikovat pouze tyto součásti; zbylá část obvodu je pro všechny kanály společná. V důsledku toho se nabízí rozdělit celý obvod na dva samostatné celky:

- Napájecí obvod
- Spínačový obvod

První zmíněný bude obsahovat všechny společné části obvodu, na kterých není případné rozšíření měřicích možností závislé, tzn. napájecí, měřicí a řídicí části. Druhý obvod pak bude obsahovat 16-kanálový přepínač s budiči a vizuální indikací. Oba obvody pak uživatel propojí (napájení a signály pro budiče), k čemuž by se mohlo využít běžně používaných průmyslových konektorů. Během realizace se tak nesmí zapomenout na další jeden konektor, který bude eventuálně sloužit pro propojení s případným rozšiřujícím obvodem.

4 Realizace kabelového testeru

Předchozí kapitola byla věnována prvotnímu teoretickému návrhu obvodu, jenž by měl být schopen vykonávat činnost plynoucí ze zadání. Jedním z požadavků zadání je také navržený systém realizovat a otestovat tak validitu návrhu. V této kapitole tak bude provedeno stručné shrnutí dosavadních požadavků a návrhů řešení, výběr elektronických součástek splňujících definované vlastnosti a posléze i samotná realizace výsledného řešení. Výstupem bude funkční prototyp zařízení, které je rovněž hlavním výstupem této diplomové práce.

4.1 Stanovení konečných požadavků

Pro návrh samotného finálního schématu zapojení je již třeba mít z velké části vyjasněných několik bodů. Teprve až v závislosti na nich je možné postupovat v realizaci dále. Mezi tyto kritické body lze řadit:

- počet samostatných celků obvodu a jejich propojení,
- napájení a zdroje napětí,
- typ mikropočítače pro řízení,
- způsob připojení testovaného kabelu,
- způsob montáže součástek,
- software pro návrh schématu a DPS.

Na několik z těchto bodů již byla dostatečně jasně dána odpověď v předchozí kapitole, a tudíž je možné je považovat za vyřešené. Jejich soupis je uveden níže. Odpovědi na otázky zbývajících bodů budou dány ihned poté.

Řešení důležitých otázek

1. Celý obvod bude rozdělen na dva samostatné celky – část napájecí a řídicí a část spínačovou. Jejich propojení bude dosaženo kabely a za pomoci konektorů s vlastnostmi umožňující bezproblémový provoz. Počet pinů konektoru není potřeba v této fázi určovat.
2. Bude použito pouze jediné napájecí napětí, a to s pomocí síťového adaptéru s výstupem 12 V a dostatečným výkonem. Toto napětí bude přivedeno k napájecím vstupům DC/DC měničů, jež budou do zbytku obvodu dodávat požadované hodnoty napětí pro jednotlivé části. Zapotřebí budou 3 takovéto měniče.

Pro řízení bude, jak už bylo v předchozích kapitolách několikrát zmíněno, využít mikropočítač. Ideální variantou by byl levný, snadno ovladatelný mikropočítač s pod-

porou čtení a zápisu textových souborů (viz požadavky zadání) a s možností připojení periférií přes sběrnice. Všechny tyto požadavky splňuje hardware Raspberry Pi. Tento počítač je navíc běžně a snadno dostupný a snadno ovladatelný, proto se pro řízení použije některý z jeho modelů.

Co se týče způsobu připojení testovaného kabelu, možností, jak vyřešit tuto otázku, je několik. Jelikož se testovaný kabel bude zapojovat do obvodu mezi low-side a high-side tranzistory spínačového obvodu, bude třeba zakomponovat konektory (celkem minimálně 32 vývodů) pro jeho připojení. Možností je několik a všechny v určité fázi návrhu připadaly v úvahu:

- dva 16-pinové průmyslové konektory,
- dvě svorky Wago do DPS, každá se 16 póly,
- jeden průmyslový konektor s minimálně 32 piny.

Po dohodě s vedoucím práce však volba padla na poslední ze zmíněných variant. Díky zvolenému typu připojení se značně zvýší efektivita a rychlost při výměně testovaných kabelů vytvořením univerzálních redukci pro různé typy připojovaných konektorů.

Z důvodu maximální redukce rozměrů výsledného obvodu bude nejvhodnějším způsobem montáže součástek povrchová montáž. Součástky s pouzdry určenými pro tento typ montáže dosahují zpravidla menších rozměrů a při návrhu DPS je možné je bez problému umístit na obě strany plošného spoje. Právě díky této možnosti lze efektivně využít i malý prostor. Samozřejmě že ne všechny součástky budou dostupné v pouzdrech pro SMT (Surface Mount Technology – povrchová montáž) a některé se do obvodu připojí i THT technologií (Through Hole Technology – montáž skrze desku).

Posledním nezodpovězeným bodem zůstává, který z dostupných software se použije pro samotný návrh realizace. Zde se jedná opravdu o subjektivní názor každého, každému člověku může vyhovovat něco jiného. Z důvodu dostupnosti (freeware licence, jednoduchost, uživatelská přívětivost...) bude obvod pro účely této práce navržen v programu KiCad [23].

Shrnutí výše zodpovězených bodů:

Řešení důležitých otázek – pokračování

3. Pro softwarové řízení bude použito některého z počítačů Raspberry Pi. Jelikož nejde o složitou aplikaci, pravděpodobně postačí kterýkoliv z menších modelů.
4. Vstupně-výstupní rozhraní pro připojení testovaného kabelu bude realizováno jediným konektorem s nejméně 32 piny. Tak bude možné vytvořit

univerzální spoje s protikusem tohoto konektoru a redukcemi na konektory testovaných kabelů. Nebude tak omezena univerzálnost.

5. Při výběru komponent bude kladen důraz na možnost povrchové montáže. Tento krok ušetří mnoho prostoru na výsledném spoji.
6. Obvodové schéma zapojení a DPS budou navrženy v dostupném freeware programu KiCad.

4.2 Výběr potřebných komponent

Aby se mohlo přistoupit k návrhu obvodového schématu a posléze i návrhu plošného spoje, je nutné vědět, jaké součástky budou ve výsledném obvodu použity. Výběrem konkrétních komponent se získají informace o jejich zapojení, počtu vývodů a také o jejich pouzdrech a rozložení. Jde tedy o důležitý krok v celé realizaci.

V této podkapitole se provede výběr konkrétních součástek od nejvíce kritických po ty s nižší prioritou. Při výběru bude brán ohled zejména na požadované elektrické vlastnosti, rozměry komponent a jejich dostupnost.

4.2.1 DC/DC měniče

Za nejkritičtější bod celého obvodu lze považovat zajištění napájení. Během návrhu v Podkap. 3.3.1 se stanovilo nutné použití tří měničů napětí – 100 V a dvakrát 5 V.

Měniče napětí 12 V \leftarrow 100 V budou vyžadovat nejvíce pozornosti. Takovéto měniče nebývají v praxi hojně užívány, navíc běžně nebývají malých rozměrů. Po vyčerpávajícím průzkumu trhu s těmito součástkami byl však nalezen sortiment výrobce *XP Power*. Měniče vyráběné touto společností jsou téměř miniaturních rozměrů, připravené k montáži na/do DPS a poskytují požadovaný výkon i funkci. Všem požadavkům zadání pak zjevně vyhovuje měnič **A01P-12**, který je také vyobrazen na ilustrační fotografii na Obr. 4.1. Jedná se o oddělený měnič napětí nabízející dostatečný výkon. Přesto, že pro zajištění správné funkce není nutné použití oddělených měničů, byl tento model vybrán právě pro jeho malé rozměry, dostatečný výkon a možnost použití jako modulu v DPS. Cena v této otázce není prioritou.

Zbylé dvě součástky již nejsou tak kritické, neboť jejich zastoupení na trhu je poměrně značné. Pro zajištění dostatečného napájecího výkonu pro počítač Raspberry Pi by bylo vhodné použít regulátor napětí s vysokou účinností a stabilním výstupem. Proto se rozhodlo o použití běžně dostupného modulu **CM02-ADJ** (viz Obr. 4.2), jenž je řízen pomocí standardního spínaného regulátoru LM2596. Tento modul již obsahuje veškeré potřebné komponenty a lze jej zakomponovat do DPS jako celek,



Obr. 4.1: Ilustrační fotografie DC/DC měniče modelu A01P-12 od výrobce XP Power. Zdroj: datasheet výrobce [30]

není nutné celý obvod navrhovat. Výstupní napětí je možné nastavit trimrem, výstupní proud může dosahovat hodnoty až 3 A. Jeho nevýhodou je však velký rozměr.

Posledním měničem, který bude využit pro vytvoření potenciálu pro sepnutí P-FET tranzistorů, byl zvolen model **AM1S-1205SZ** od výrobce Aimtec. Jeho rozměry a dostačující výkon představují ideální volbu. Navíc se jedná o běžně dostupnou součástku i u nás, čemuž odpovídá i relativně nízká cena.



Obr. 4.2: Ilustrační fotografie modulu DC/DC měniče modelu CM02-ADJ. Modul bude do výsledné DPS zakomponován jako celek. Zdroj: <https://bit.ly/3etexSk> (cit. 5.5.2021)

4.2.2 MOSFET tranzistory

Dalšími kritickými komponentami pro správnou funkci celého systému jsou MOSFET tranzistory. Pro absolutní minimalizaci se zde nabízí použití tranzistorových polí. Díky nim by se značně zredukoval prostor potřebný pro celý spínačový obvod, kde jsou tranzistory majoritními součástkami. Bohužel se však nepodařilo nalézt takové tranzistorové pole, které by dokázalo spínat napětí až 100 V, jak to požaduje zadání. Z toho důvodu bude nutné využít mnohem větších a robustnějších tranzistorů schopných takovýchto napětí. Rovněž je, kvůli náhodným výkyvům či překmitům, vhodné zvolit do jisté míry předimenzované tranzistory.

Tranzistory N-FET byly nakonec zvoleny typu **BSP89** od výrobce Infineon. Dle datasheetu [13] je schopen napětí U_{DS} až 240 V a rychlého spínání. High-side tranzistory s kanálem typu P pak dodá výrobce Nexperia ze stejné řady, model **BSP230**. Jejich napětí U_{DS} se může pohybovat až na hodnotách -300 V (viz [18]), což je pro účely použití rovněž naprosto dostatečné. Oba tyto modely tranzistorů jsou navíc dodávány ve stejném pouzdře pro SMT montáž SOT223 a celý obvod tedy zůstane symetrický a jednotvárný.

4.2.3 Integrované obvody

Ve chvíli, kdy je zajištěno napájení a spínání, je možné začít s výběrem integrovaných obvodů, tedy s komponenty, které zajišťují funkcionalitu. Integrovanými obvody v této práci jsou posuvné registry, optočleny a AD převodník. V tomto pořadí bude také jejich výběr popsán v této podkapitole.

Posuvné registry

Posuvný registr bude řízen po sběrnici signály z mikropočítače a jeho účelem bude spínat (budit) jednotlivé tranzistory ve spínačovém obvodu. Jedná se rovněž o důležitou součástku pro další rozšiřitelnost. Ideální situací by bylo zajistit takový posuvný registr, který by umožňoval buzení všech buď high-side nebo všech low-side tranzistorů v jediném obvodu. Jinými slovy, ideální posuvný registr by měl 16 bitů a pracoval by s paralelním výstupem. Takové obvody sice existují, avšak nebyly k dostání od spolehlivého dodavatele za rozumnou cenu.

Z toho důvodu se rozhodlo o použití 8-bitových posuvných registrů, běžně u nás dostupných. Volba tedy padla na model *74HC164D,652* od výrobce Nexperia. Tento model je typickým 8-bitovým posuvným registrem s asynchronním resetem, schopný řízení přes sběrnici SPI. Pracuje v režimu sériového vstupu a paralelního výstupu, splňuje tedy i tento požadavek. Má vyvedené dva vstupy, přičemž tyto jsou připojeny k hradlu AND. Plánované použití sice nepočítá se dvěma paralelními vstupy,

avšak díky zmíněnému hradlu se nejedná o problém, jednoduše se propojí. Registr je také, mimo jiné, dodáván v pouzdrech pro SMT montáž, čímž nebrání minimalizaci obvodu [17]. Celkem se do obvodu musí zapojit 4 tyto posuvné registry (celkem 32 bitů).

Optočleny

Optočlen je součástka, která slouží ke galvanickému oddělení dvou obvodů. Skládá se z LED diody (zpravidla emituje světlo v oblasti infračervených vlnových délek) mezi vstupními svorkami a z fotocitlivé polovodičové součásti (např. tranzistor) mezi výstupními svorkami. Když LED diodou prochází proud, začne emitovat fotony, které dopadají na fotocitlivý polovodičový prvek. V závislosti na velikosti proudu se tento prvek „otevívá“ a spíná k němu připojený obvod. Díky tomuto principu tak lze řídit obvody s rozdílem potenciálů v řádech i stovek voltů.

Jelikož je třeba spínat napětí 100 V mikropočítačem pracujícím s napětími 3.3 V a 5 V, musí se optočleny opravdu využít. Mikropočítač pracuje s logickými úrovněmi, proto bude vhodné použít i optočlen s logickým výstupem. Tím je například zvolený *H11L1M* od výrobce ON Semiconductor. Na jeho výstupu je realizován Schmittův klopný obvod, jenž zajišťuje regulaci nechtěných záskmitů a rychlé spínání. Je běžné k dostání a dodává se také v pouzdrech pro SMT.[16]

Analogově-digitální převodník

Posledním typem integrovaného obvodu, který bude třeba pro správnou funkci do obvodu zakomponovat, je AD převodník. Ten bude připojen k omezovacímu rezistoru, kde bude měřit hodnotu protékajícího proudu, na základě čehož bude možné určit hodnotu izolačního odporu i správnost propojení prvků testovaného kabelu.

AD převodník pro tento účel by měl být schopen diferenciálního zapojení, což by zajistilo dostatečnou přesnost, a mělo by být možné jej připojit k mikropočítači po některé z podporovaných sběrnic. Vybraná součástka *MCP3424-E/SL* od výrobce Microchip Technology splňuje všechny stanovené požadavky. Pracuje s 18 bity, podporuje až 4 vstupní měřené kanály s diferenciálním zapojením vstupů a komunikaci přes I²C sběrnici. Pro účely této práce je tento AD převodník nadmíru dostačující. Jedinou nevýhodou je jeho horší dostupnost u českých dodavatelů, avšak tento problém je řešitelný poptávkou v zahraničí. [15]

4.2.4 Raspberry Pi

Počítače Raspberry Pi jsou na trhu k dispozici ve čtyřech generacích a dalších menších provedeních. Všechny standardní modely jsou plnohodnotnými jednodeskovými

počítači pracujícími s open-source operačním systémem Linux. Pro lepší optimalizaci byla dokonce vytvořena speciální verze standardní distribuce Debian, vhodná pro použití v těchto počítačích – Raspbian. Nezávisle na provozovaném operačním systému je ale všechny standardní modely Raspberry Pi možné provozovat jako standardní osobní počítače. Umožňují rovněž připojení periferií (klávesnice, myš, displej, monitor. . .). I když se jedná o jednodeskové malé zařízení, stále jsou pro účely této práce „příliš rozměrné“.



Obr. 4.3: Modul mikropočítače Raspberry Pi Zero WH. Počítač podporuje Wi-Fi připojení a je opatřen 40-pinovým GPIO headerem. Zdroj: <https://bit.ly/3vMQDHe>

Vzhledem k tomu, že počítač je v této práci potřeba pouze pro řízení budičů a měření proudu po sběrnici, není nutný velký výkon ani mnoho funkcí. Jedinými reálnými požadavky zůstávají provoz zmíněných sběrnic, možnost zápisu a čtení textových souborů a jednoduché ovládání. Všechny tyto podmínky splňuje také, mimo standardní modely, *Raspberry Pi Zero W* (viz Obr. 4.3). Zmenšená verze klasického Raspberry Pi opatřená 40-pinovým GPIO headerem s podporou Wi-Fi připojení. Právě díky bezdrátovému síťovému připojení nebude třeba žádných periferií, celý počítač lze jednoduše konfigurovat skrze SSH připojení na jedné síti.

Zvolený model vyžaduje napájení přes micro USB konektor, tedy skrze napětí

5 V, čehož lze jednoduše dosáhnout vyvedením z výsledné DPS. Nebude tak potřeba dalšího externího napájecího adaptéru. Paměť počítače je řešena externí micro SD kartou. Na této kartě bude nahrán operační systém Raspbian OS Lite, tedy minimální obraz systému bez dalšího nepotřebného software (neobsahuje GUI a další aplikace). Veškerá komunikace s počítačem bude probíhat, jak již bylo zmíněno, přes SSH vzdálené připojení po síti, k čemuž je však potřeba vytvoření prvotního konfiguračního souboru pro automatické připojení k Wi-Fi.

4.2.5 Rezistory, kondenzátory, diody

Posledními potřebnými obvodovými součástkami jsou už pouze rezistory, kondenzátory a diody. Zde není nutné určovat přesné hodnoty ani pouzdra, neboť tyto budou řešeny operativně během sestavování obvodu. Důležitou vlastností těchto komponent však bude možnost jejich povrchové SMT montáže, aby na spoji nevyžadovaly velké množství prostoru a aby bylo možné je letovat na obě strany desky, aniž by se navzájem omezovaly. Pouzdra budou vybírána klasická, tj. 0805, 1206 a 2512.

Jistotou bude zajištění rezistorů s hodnotami odporů $0\,\Omega$, které je možné letovat na místa, kde odpor není vlivem situace potřeba (avšak by mohl být), a $100\,\text{k}\Omega$, který bude potřeba na místo měřeného rezistoru. Při výběru LED diod pro indikaci sepnutí tranzistorů pak bude kladen důraz na zelenou barvu jejich světla, neboť tato barva je v běžné praxi používána pro indikaci správné funkce (narozdíl od žluté nebo červené).

4.2.6 Konektory

Aby bylo možné obě navržené DPS propojit a transportovat tak všechna potřebná napájecí napětí a všechny řídicí signály k budičům, budou zapotřebí konektory. Pro napájení počítače bude jistě nutné vyvést z DPS konektor se dvěma piny (5 V a GND). Dále pro vyvedení signálů sběrnic z Raspberry Pi se předpokládá alespoň 8 pinů a pro propojení obou desek pak alespoň 10 pinů.

Důležitým konektorem je také univerzální konektor sloužící pro připojení redukce s testovaným kabelem. Kvůli požadavku na minimálně 32 pinů tohoto konektoru je výběr značně zúžen. Pro jeho velkou dostupnost, a tedy i univerzálnost, padla nakonec volba na standardní D-SUB konektor „samice“ s 37 vývody. 5 vývodů tím pádem zůstane nevyužito. V porovnání s dalšími dostupnými možnostmi řešení jde však o marginální problém.

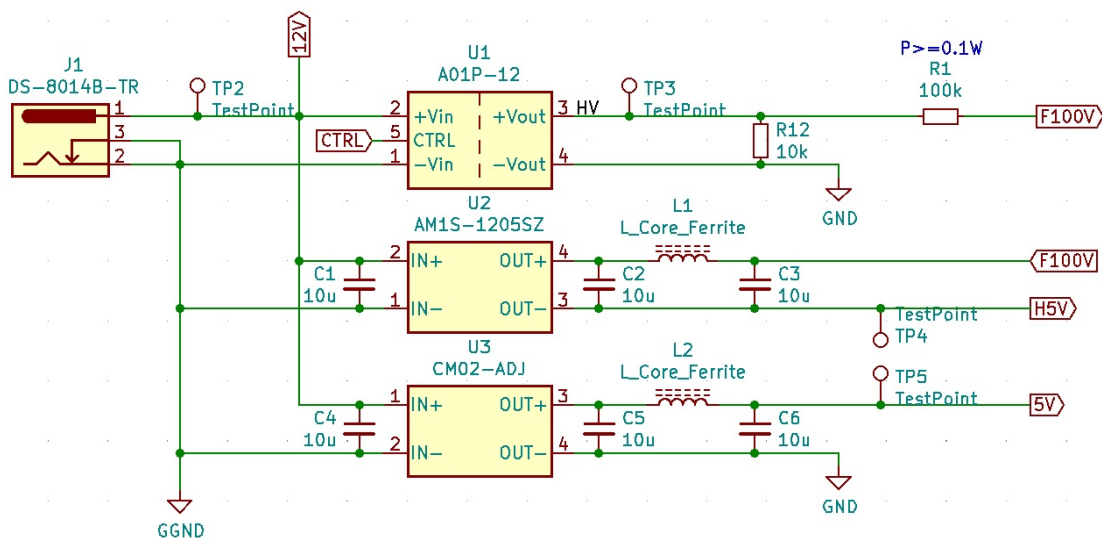
4.3 Návrh obvodového schématu zapojení

Nyní, když jsou vybrány konkrétní potřebné komponenty, je možné se přesunout k samotnému návrhu obvodového schématu zapojení. Pro tyto účely je třeba zprovoznit návrhový software KiCad, po jehož instalaci a spuštění založit nový projekt. Ve skutečnosti byly založeny dva projekty, a to z důvodu, že KiCad není zcela uživatelsky přívětivý, co se týče více schémat v jediném projektu. Neboť jsou plánovány dva oddělené obvody, budou potřebná dvě schémata. V této podkapitole bude nyní popsán proces návrhu pro každý obvod zvlášť.

4.3.1 Návrh schématu napájecího obvodu

Prvním navrhovaným bude obvod zajišťující napájení celého zařízení. Na následujících obrázcích budou vyobrazeny jednotlivé části schématu, které budou rovněž popsány a bude vysvětlena jejich funkce. Celé schéma zapojení je pak možné nalézt v Příl. A.

Nejdůležitější částí celého tohoto obvodu je bezesporu napájecí část, jež je vyobrazena na Obr. 4.4. Ve schématu je možné vidět přívodní konektor **J1**, jenž je klasickým souosým konektorem pro připojení stejnosměrného napětí z adaptéru se zástrčkou standardních rozměrů 5.5 mm 2.1 mm. Tento konkrétní typ je uzpůsoben pro povrchovou montáž a jeho prostřednictvím bude do obvodu přivedeno externí napětí 12 V. Na výstupu byl rovněž umístěn testovací bod pro ověření správné funkce.

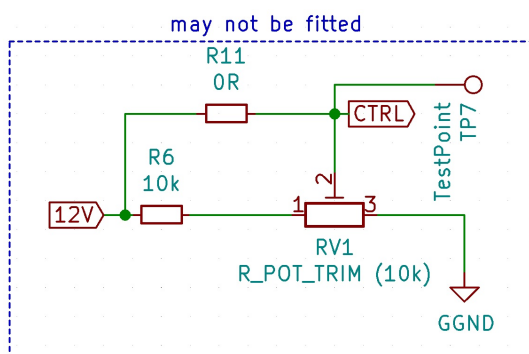


Obr. 4.4: Schéma obvodového zapojení DC/DC měničů. Všechny měniče jsou napájeny z jediného externího zdroje a na svých výstupech generují příslušné napětí.

K oběma vývodům napájecího konektoru jsou poté paralelně připojeny tři DC/DC měniče napětí: **U1**, **U2** a **U3**. Prvním z nich je oddělený měnič A01P-12 s výstupním napětím 100 V. Tento měnič má kromě dvou napájecích vstupních vývodů také řídicí pin, kterým je možné regulovat napětí na výstupu v případě nízké zátěže. Vzhledem k tomu, že v době návrhu nebylo jasné přesné chování tohoto měniče, byl tomuto řídicímu pinu předřazen dělič napětí s odporovým trimrem. Toto zapojení je možné vidět níže na Obr. 4.5. Na výstupu měniče U1 je možné dále vidět testovací bod, pro ověření správného výstupního napětí, a omezovací rezistor R1, jehož funkcí je omezit proud procházející měřicím obvodem na max. 1 mA. Označení sítě *F100V* pak určuje unikátní jméno pro další rozvod.

Měnič U2 generuje na svém výstupu potenciál 5 V a je zde potřeba na vytvoření napětí pro spínání MOSFET tranzistorů. Je na svém výstupu připojen k síti F100V což zajišťuje, že i při zkratu této sítě na zem bude rozdíl potenciálů vždy 5 V. Právě tento potenciál je vyveden označením sítě *H5V*, tedy „horních 5 voltů“. Na tuto síť byl rovněž umístěn testovací bod, aby bylo možné ověřit správnou hodnotu napětí. Kondenzátory na vstupu i výstupu a tlumivka na výstupu nejsou nutností a do schématu byly zakomponovány pouze pro případ velkého zvlnění. V případě, že nebudou potřeba, se kondenzátory neosadí a tlumivka bude nahrazena rezistorem o odporu 0 Ω .

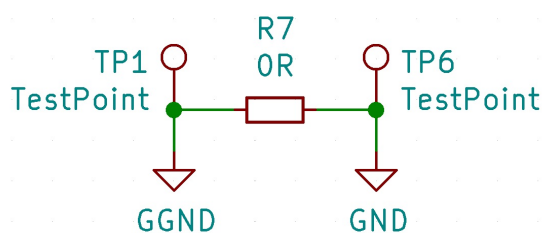
Posledním z použitých měničů je měnič U3, konkrétně se jedná o modul CM02-ADJ. Tento měnič je zapojen podobně jako předchozí zmíněný, avšak svůj kladný výstupní vývod nemá připojen k žádnému potenciálu a generuje tedy napětí 5 V vůči zemi. Toto výstupní napětí je třeba nejprve ručně nastavit zabudovaným trimrem, modul totiž nabízí nastavitelný výstup v závislosti na žádaném použití. Síť označující tento potenciál byla pojmenována *5V*. Zapojení kondenzátorů a tlumivek je totožné jako v předešlém případě a vztahují se k nim stejné podmínky.



Obr. 4.5: Zapojení děliče napětí s trimrem pro zajištění požadované hodnoty napětí na řídicím vstupu DC/DC měniče U1. Přidaný odpor R11 umožňuje případně tuto část obvodu ignorovat.

Co se týče části obvodu na Obr. 4.5, jejím účelem je zmíněné omezení napětí na výstupu měniče U1. Trimr RV1 spolu s rezistorem R5 tvoří dělič napětí v poměru max 1 ku 1 a je tak možné ovlivnit napětí na řídicím vstupu měniče. Pro případ, že tohoto děliče nebude třeba, byl do obvodu zakomponován i rezistor R11 s hodnotou odporu 0Ω , který bude osazen pouze a právě jen v tomto případě.

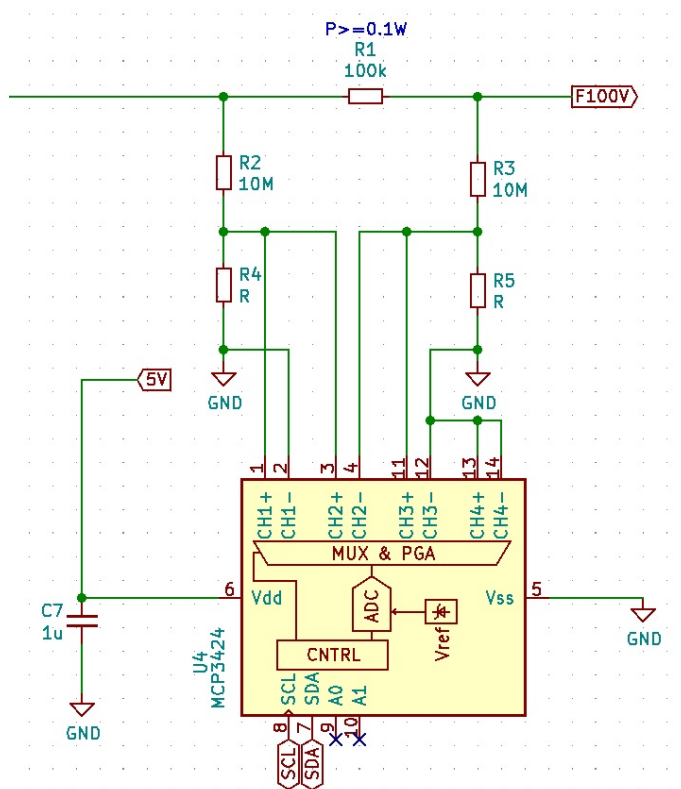
Jelikož jsou měniče U1 a U2 elektricky oddělené, zemní potenciály na jejich výstupech jsou plovoucí. Z tohoto důvodu je vhodné propojit tyto potenciály, čímž se dosáhne menšího šumu a jednotného zemního potenciálu. Jednoduché propojení je řešeno rezistorem s hodnotou 0Ω zapojeným mezi tyto dvě sítě (viz Obr. 4.6).



Obr. 4.6: Propojení dvou oddělených zemních potenciálů pomocí rezistoru 0Ω .

Dalším prvkem je zapojení AD převodníku. Bylo stanoveno, že tento převodník bude měřit proud v místě omezovacího rezistoru R1. Vybraný model převodníku umožňuje měření na 4 kanálech a lze zapojit diferenciálně. Je ale napájen ze sítě 5V, a proto jeho kanály není možné zapojit přímo k síti F100V. Nabízí se sice napájení přímo ze sítě F100V a H5V, avšak pak by bylo potřeba zapojení pouze jednoho měřicího kanálu (ztratila by se přesnost). Tedy, aby bylo možné jej napájet z nižších 5 V, bude třeba vytvořit dělič napětí paralelně s měřeným rezistorem R1 (vyobrazeno na Obr. 4.7). Rezistory R2 a R3 byly zvoleny s velkými hodnotami $10\text{M}\Omega$, aby se předešlo přílišnému rušení zbytku obvodu. Oproti tomu rezistory R4 a R5 budou voleny experimentálně v hodnotách $1\text{k}\Omega$ až $10\text{k}\Omega$. Zapojení převodníku pak bude provedeno pro měření úbytku napětí na těchto rezistorech s nižšími hodnotami odporů a dále pro měření rozdílu potenciálů mezi částí obvodu před a za R1. Celá komunikace s počítačem bude provedena pomocí sběrnice I²C, čemuž odpovídá i zapojení vstupních signálů *SCL* a *SDA*. Adresní vstupy zůstávají nezapojeny.

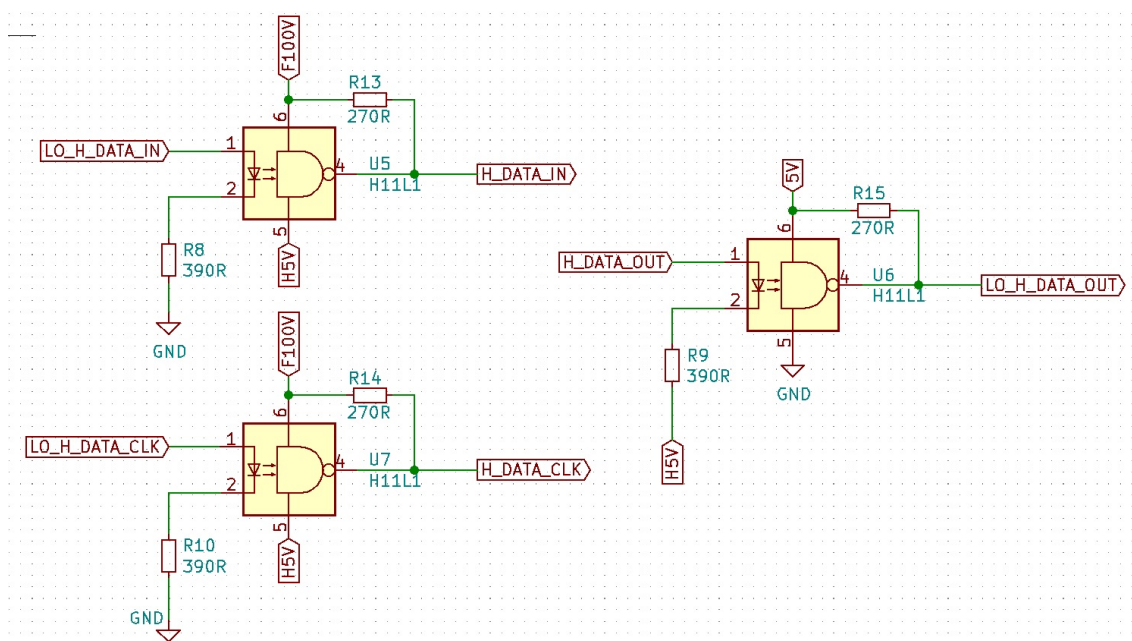
Jak již bylo zmíněno výše v práci, high-side tranzistory ve spínačovém obvodu budou přímo buzeny z posuvných registrů napájených z horní napěťové hladiny. Proto je třeba galvanicky oddělit signály z řídicího počítače a transformovat je na signály stejné napěťové úrovně. Pro tento účel byly zvoleny optočleny, které je možné vidět v části schématu na Obr. 4.8. Optočleny využívají na výstupu Schmittova klopného obvodu s negovanou logickou úrovní. Pokud tedy vstupní signál překročí napěťovou úroveň H (high), na výstupu se sepne hodnota L (low), tzn. hodnota, která



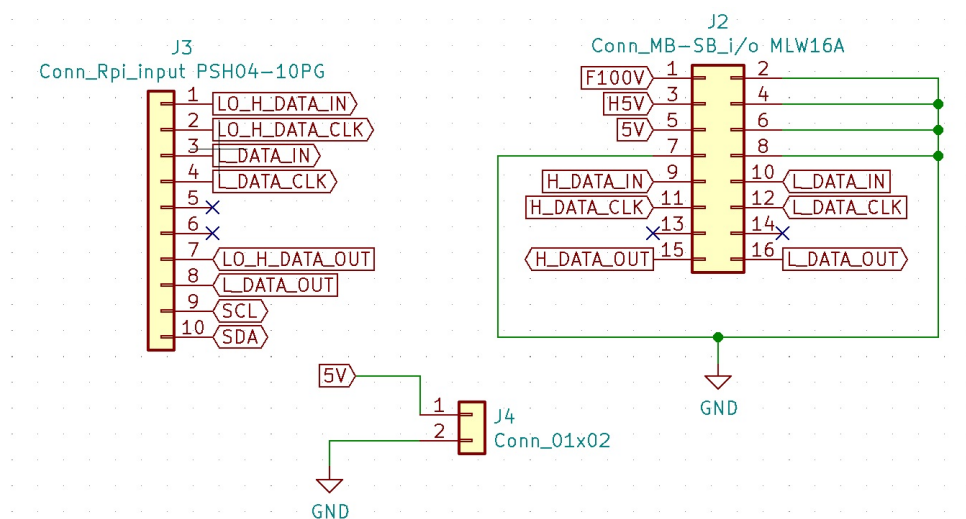
Obr. 4.7: Zapojení AD převodníku k omezovacímu rezistoru R1 přes napěťový dělič. Použity jsou 3 měřicí kanály.

vybudí otevření tranzistoru s kanálem P. Při změně vstupu na hodnotu L pak nastane přesný opak. Rezistory na vstupech optočlenů plní funkci omezovacích odporů a v případě jejich nadbytečnosti budou nahrazeny rezistory 0Ω .

Poslední částí napájecího obvodu je propojení se spínačovým obvodem a s Raspberry Pi. Toto propojení bude realizováno konektory vyobrazenými na Obr. 4.9. Konektor **J2** byl zvolen 16-pinový pro případ dalšího budoucího rozšíření a na jeho piny byla přivedena všechna napájecí napětí, země a signály pro budiče. Tento konektor propojí obě realizované DPS. Na druhé straně konektor **J3** přivádí právě signály od řídicího počítače do obvodu (jednak k optočlenům, jednak k ADC a jednak na budiče skrze konektor J2). Posledním konektorem je dvoupinový konektor **J4**, jenž zajišťuje napájení Raspberry Pi ze sítě 5V.



Obr. 4.8: Zapojení logických optočlenů se Schmittovým klopným obvodem. Tato část obvodu zajišťuje transformaci nízkonapěťových signálů do řádově vyšších napěťových úrovní a naopak (optočlen H6).

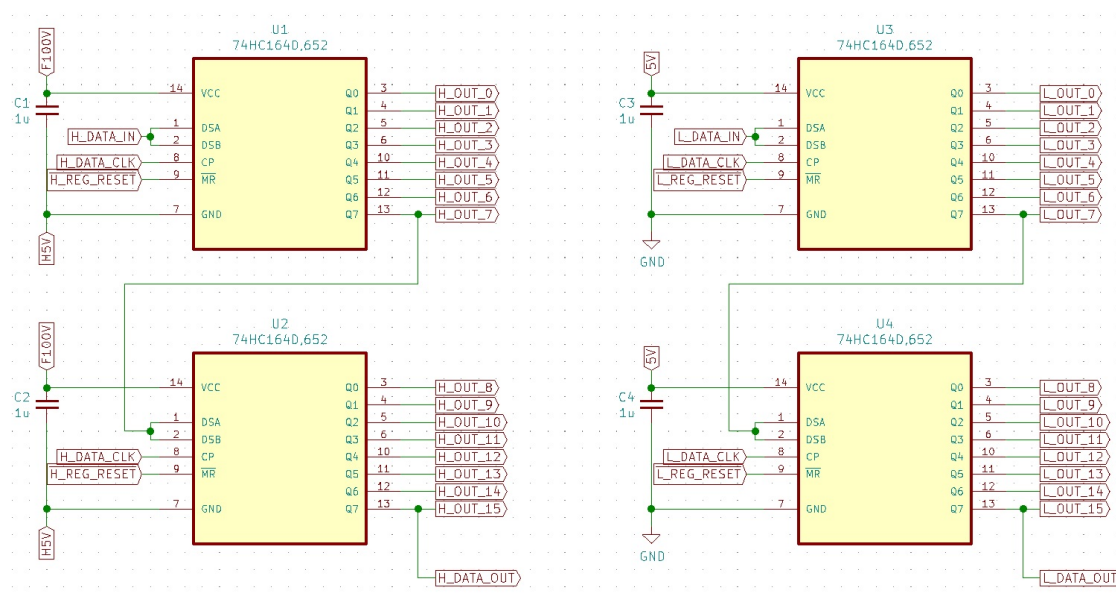


Obr. 4.9: Zapojení signálů a sítí přenášených na další části obvodu na jiných DPS.

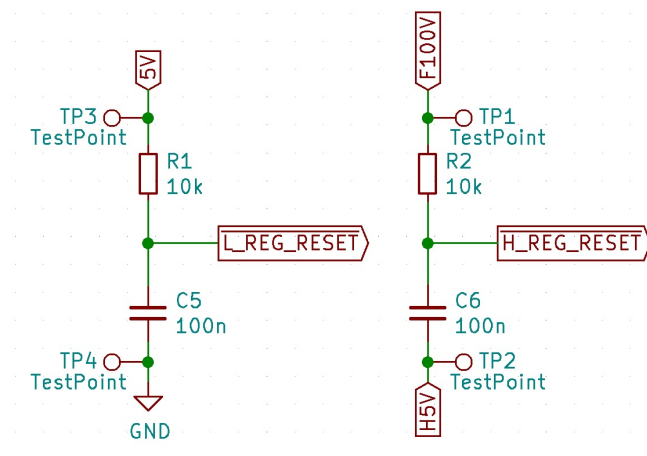
4.3.2 Návrh schématu spínačového obvodu

Další přichází na řadu návrh obvodu se spínači a jejich budiči. Zapojení tohoto obvodu je o mnoho jednodušší než u napájecího obvodu, a to z důvodu, že je převážně tvořen opakujícími se prvky. V této kapitole budou opět jednotlivé části tohoto obvodu vyobrazeny, popsány a bude vysvětlena jejich funkce. Celé schéma zapojení je pak vloženo na konci práce jako Příl. B.

Základem správné funkce spínačového obvodu jsou budiče tranzistorů, které jsou k vidění na Obr. 4.10. Jak je možné na tomto obrázku vidět, v obvodu jsou skutečně použity čtyři 8-bitové posuvné registry. Registry **U1** a **U2** budou budit high-side tranzistory, na druhé straně registry **U3** a **U4** pak tranzistory v low-side zapojení. Příslušné budiče jsou napájeny takovým napětím, jaké ve skutečnosti vysílají na svůj výstup. Vstupní piny *DSA* a *DSB* jsou propojeny, a to z důvodu jejich interního připojení k hradlu AND, jak bylo uvedeno v Podkap. 4.2.3. Samozřejmostí je připojení hodinového signálu a asynchronního resetu (zapojení tohoto signálu je popsáno níže). Výstupy všech posuvných registrů jsou pak přímo vyvedeny na hradla příslušných tranzistorů. Na obrázku je také vidět jednoduchost zřetězení těchto součástek, a tedy možnost dalšího rozšíření obvodu. Poslední výstup registru je přivezen na vstup registru dalšího. Pro případ, že by bylo potřeba připojit další registry, je vyveden výstup **_DATA_OUT*, kde proměnlivý znak „*“ značí, zda se jedná o high-side nebo low-side budič.



Obr. 4.10: Schéma zapojení posuvných registrů jako budičů linek jednotlivých kanálů ve spínačovém obvodu. Zřetězení je zajištěno propojením posledních výstupních bitů s dalšími registry.

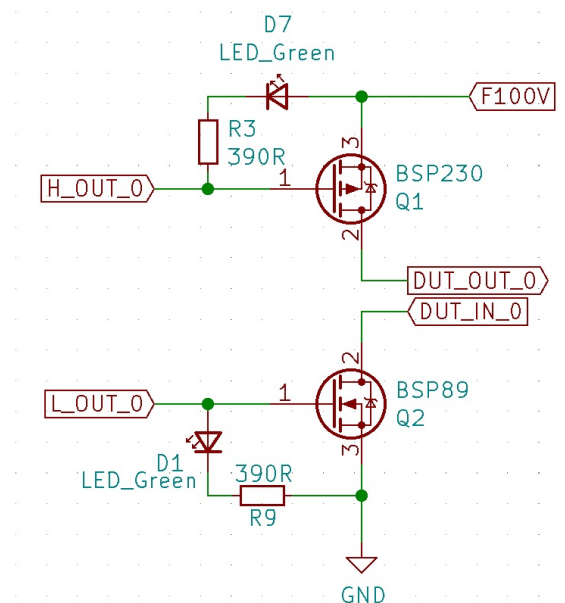


Obr. 4.11: Schéma zapojení asynchronního nulování posuvných registrů.

Jak již bylo zmíněno výše, zvolené posuvné registry využívají asynchronního nulování – resetu. Ve chvíli, kdy je zařízení odpojeno od napájení a posléze opět připojeno, není jisté, jaké hodnoty se v paměti registru nachází. Před každým testováním je tedy třeba paměť registru vynulovat. Tuto funkci zajišťuje jednoduchý obvod na Obr. 4.11. Pokud je napájení odpojeno, negovaný vstup *REG_RESET* zařídí vynulování všech registrů. Na tomto obrázku lze také vidět testovací body, které slouží pro ověření správného přivedení napětí z napájecího obvodu.

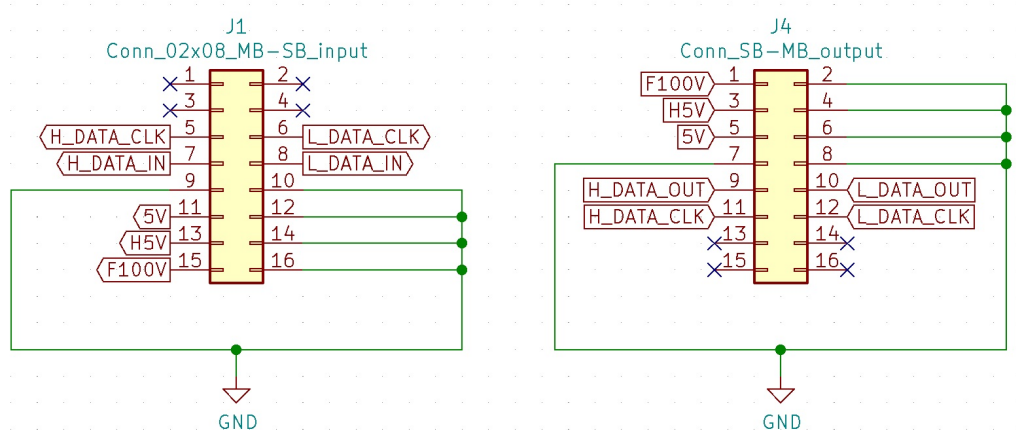
Patrně nejdůležitější částí tohoto obvodu je soustava přepínačů realizovaných MOSFET tranzistory. Zapojení jednoho z kanálů v obvodu je vidět na Podkap. 3.3.3. Těchto kanálů je v celém obvodu 16, což odpovídá požadavkům stanoveným v zadání. Lze si povšimnout, že se jedná o zapojení velmi nápadně podobné tomu dříve vyobrazenému na Obr. 3.7. Každý kanál je tvořen dvěma tranzistory. P-FET tranzistor **Q1**, na jehož elektrodu source je připojeno testovací napětí ze sítě *F100V* a jehož sepnutí je realizováno buzením na hradlo z posuvného registru, na tomto obrázku označeném sítí *H_OUT_0*, zastává funkci high-side přepínače. Naopak funkci low-side přepínače zajišťuje tranzistor **Q2**, u něhož je elektroda source přizemněna a hradlo je rovněž buzeno z posuvného registru prostřednictvím sítě *L_OUT_0*. Sítě *DUT_OUT_0* a *DUT_IN_0* jsou vyvedeny na konektor (viz Obr. 4.14), ke kterému je přímo připojen testovaný kabel. Pro indikaci sepnutí jednotlivých tranzistorů byly do schématu zakomponovány LED diody s omezovacími rezistory. Tyto LED diody se rozsvítí pouze ve chvíli, kdy je tranzistor sepnutý, a poskytují tak zpětnou vazbu uživateli.

Aby bylo možné přivést všechna napájecí napětí a řídicí signály z konektoru napájecího obvodu, je nutné tento konektor zakomponovat i do tohoto obvodu. Ve schématu na Obr. 4.13 je označen jako **J1** a slouží právě k přímému propojení kabelem k napájecímu obvodu. Kromě něj je ve schématu také možné vidět konektor



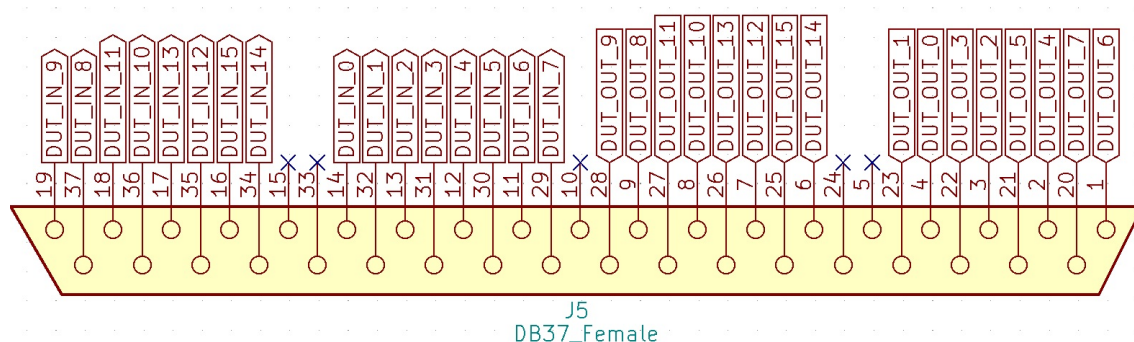
Obr. 4.12: Schéma zapojení tranzistorů v jednom z kanálů spínačového obvodu. Tranzistory jsou buzeny výstupy z posuvných registrů. Použité LED diody signalizují sepnutí hradla.

J4, jenž má na svých pinech vyvedeny stejné signály a stejná napětí. Tento konektor slouží k připojení dalších rozšiřujících desek.



Obr. 4.13: Zapojení dvou konektorů pro přivedení požadovaných signálů a napájení z jiných částí systému. Konektor J1 je dimenzován jako vstupní, konektor J4 jako výstupní (pro další rozšíření systému).

Poslední součástí potřebnou v tomto obvodu je samotný konektor pro připojení testovaného kabelu. Na jeho piny jsou přivedeny sítě z jednotlivých kanálů. Propojení těchto sítí ke konkrétním pinům bylo optimalizováno během návrhu ploš-



Obr. 4.14: Zapojení sítí k univerzálnímu konektoru pro testovaný kabel. K tomuto konektoru je zapotřebí protikus s redukcemi pro testování požadovaného kabelu.

ného spoje. Při tvoření protikusu s konektory testovaného kabelu je tedy třeba dbát důraz na správné vyvedení těchto sítí, nebo zajistit správný testovací předpis.

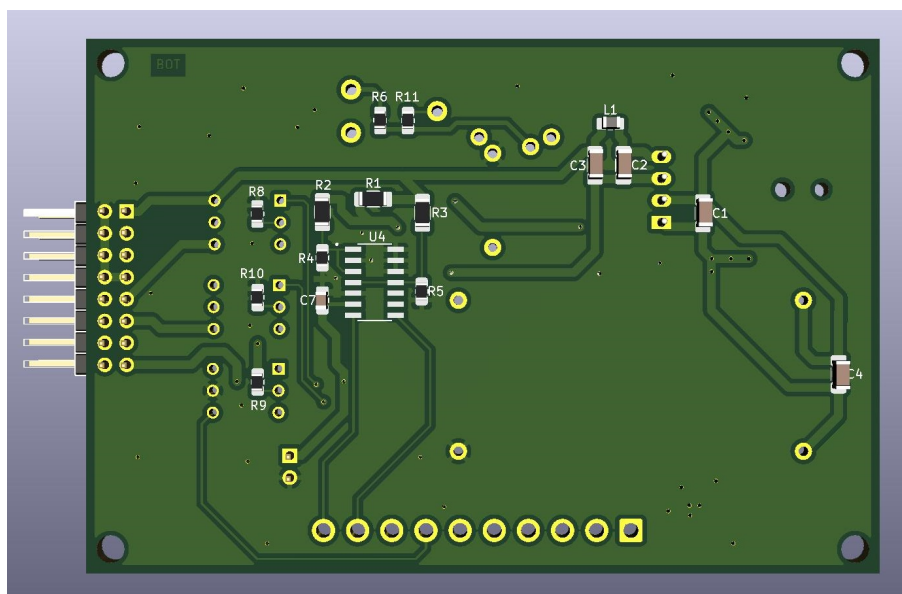
4.3.3 Pozdější úpravy schémat

Na Obr. 4.4 je možné pozorovat rezistor **R12**, jehož funkce nebyla v práci dosud popsána. Tento rezistor byl do obvodu přidán až po zadání výroby DPS a tudíž v původní verzi schématu nebyl obsažen. Důvod jeho zakomponování je ten, že během testů funkce měniče U1 bylo zjištěno, že jeho chování se blíží spíše proudovému než napětovému zdroji. Výkon měniče je při plné zátěži roven 1 W (100 V při 1 mA), tedy bylo třeba přidat paralelní rezistor pro simulování této zátěže ve všech případech. Samotný omezovací odpor R1 pak je zapojen jako bočník. Při zkratu měřicího obvodu (kontinuita prvků kabelu) se pak na výstupu projeví paralelní zapojení obou těchto rezistorů, což se projeví poklesem napájecího napětí na cca 90 V. Podmínku plynoucí ze zadání však tato hodnota splňuje.

Podobně je tomu u optočlenů na Obr. 4.8, kde původně nebyla uvažována nutnost použití pull-up rezistorů **R13**, **R14** a **R15**. Bohužel tento fakt zůstal při studiu datasheetu součástky bez povšimnutí a bylo jej tedy nutné napravit až po vyrobení desky.

4.4 Návrh desek plošných spojů

S kompletním schématem obou obvodů je možné započít návrhem DPS. Ten proběhl v návrhovém software obsaženém v programu KiCad. Bohužel tento proces nelze zcela dobře popsat, neb se skládá převážně jen z rozmístění součástek a vedení vodivých cest podle schématu zapojení. Z toho důvodu v této kapitole proběhne pouze popis všeobecných znaků návrhu a výsledné zapojení jednotlivých vrstev DPS



Obr. 4.16: 3D vizualizace spodní vrstvy DPS napájecího obvodu

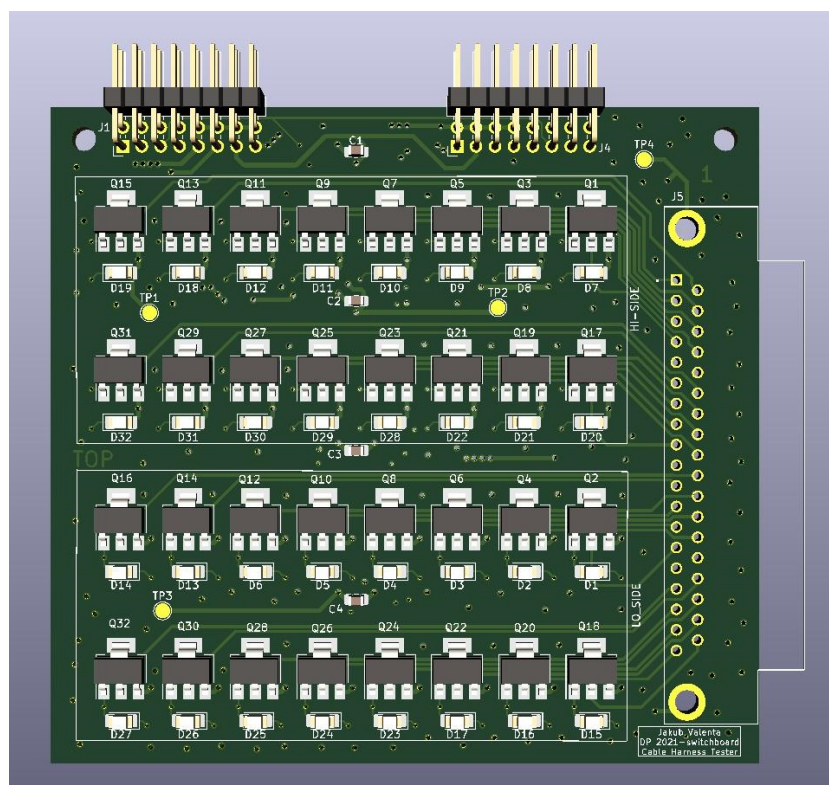
4.4.2 DPS spínačového obvodu

Z důvodu velkého množství vodivých cest byl druhý plošný spoj navrhován jako 4-vrstvá deska. Rozmístění součástek bylo z důvodu jejich počtu mnohem složitějším úkolem a bylo několikrát změněno. Jejich finální pozice nakonec umožnily dobré prostorové i vizuální oddělení částí high-side od low-side. Při návrhu bylo pro vodivé cesty i průchodky použito více tříd, které jsou opět vypsány v Tab. 4.2.

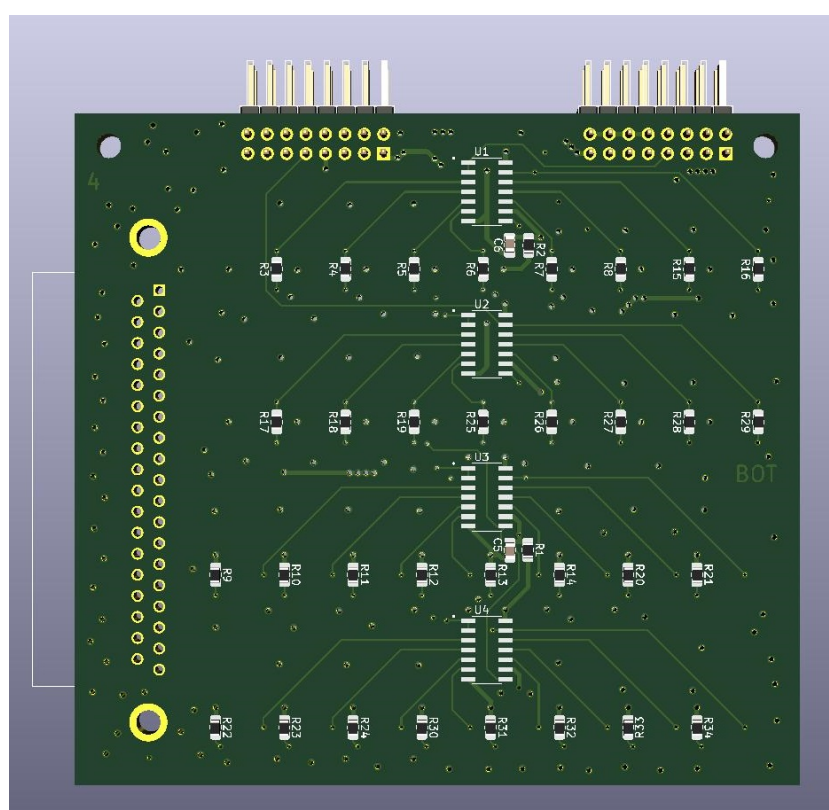
Tab. 4.2: Výpis tříd sítí použitých při návrhu DPS spínačového obvodu.

Třídy vodivých cest		Třídy vias
Šířky vodivých cest	Izolační mezery	
0.6 mm	0.3 mm	1.0/0.6 mm
0.4 mm	0.25 mm	0.8/0.4 mm
0.25 mm	0.2 mm	

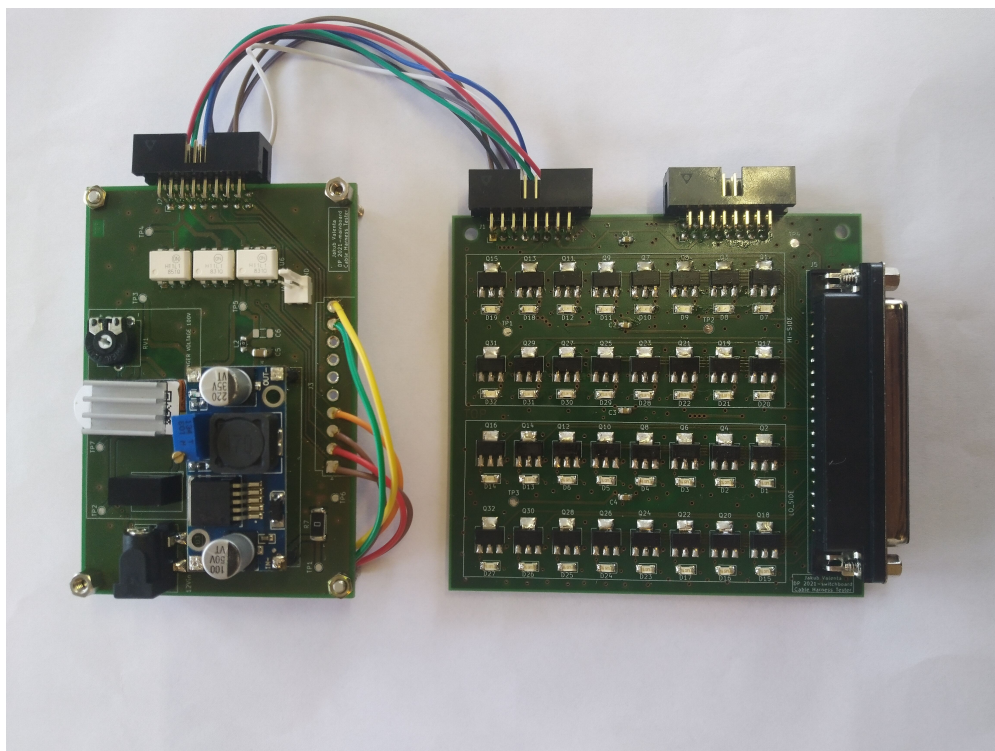
Kvůli rozložení tranzistorů bylo nutné upravit schéma zapojení konektoru pro testovaný kabel, aby vyhovoval potřebám plošného spoje a vedení vodivých cest. Z toho důvodu není zapojení konektoru na první pohled jednoznačné a při tvoření protikusů je třeba dbát na funkce jednotlivých pinů. Dokončený návrh byl opět vizualizován ve 3D a tato vizualizace je zobrazena na Obr. 4.17 a Obr. 4.18.



Obr. 4.17: 3D vizualizace horní vrstvy DPS spínačového obvodu



Obr. 4.18: 3D vizualizace spodní vrstvy DPS spínačového obvodu



Obr. 4.19: Fotografie výsledného prototypu s napájenými součástkami, propojenými deskami a řídicím počítačem.

4.5 Vytvoření ovládacího software

Jelikož je na řídicím členu Raspberry Pi spouštěn operační systém Raspbian z Linuxové distribuce, bude se ovládací software poté, co se uživatel připojí pomocí ssh vzdáleného přístupu, spouštět skrze terminál. Aby byla práce s počítačem co nejjednodušší a aby nebylo nutné instalovat mnoho podpůrného software a aplikačních balíčků, celý testovací skript bude realizován ve skriptovacím jazyce *Bash*. Celý skript je složen z 5 částí, které budou postupně popsány níže

1. Inicializace I²C rozhraní AD převodníku
2. Nastavení GPIO pinů
3. GPIO bit bang pro high-side i low-side posuvné registry
4. Převod snímaného napětí na izolační odpor
5. Samotný algoritmus testování

Inicializace I²C rozhraní AD převodník, použitý v obvodu, podporuje pro komunikaci s řídicím členem sběrnici I²C. Aby komunikace probíhala korektně, je třeba inicializovat nastavení podle datasheetu výrobce (viz [15]). Funkci, která zmíněnou inicializaci provádí, je možné vidět na Obr. 4.20. Do této funkce vstupuje jeden parametr – snímaný kanál. Podle uživatelské volby se vybere ten, se kterým bude

```

adc_read() {      #Configure 12b resolution, continuous mode, mux channel, pga 1
  CHAN="$1"
  DELAY=0.4
  if [ "$CHAN" == 1 ]; then
    ADC_CFG_INIT=0x18
  elif [ "$CHAN" == 2 ]; then
    ADC_CFG_INIT=0x38
  elif [ "$CHAN" == 3 ]; then
    ADC_CFG_INIT=0x58
  elif [ "$CHAN" == 4 ]; then
    ADC_CFG_INIT=0x78
  else
    echo 1>&2 "Error: Invalid ADC channel $CHAN"
    exit 1
  fi

  #Write configuration
  i2cset -y "$I2C_BUS" 0x68 "$ADC_CFG_INIT" // exit 1
  sleep "$DELAY"

  #Read 3 bytes (2 value, 1 cfg)
  RAW=$(i2ctransfer -y "$I2C_BUS" r3@0x68)
  if [ "$?" != 0 ]; then
    exit 2
  fi

  #Extract 12 bit hex value
  HEX=$(echo ${RAW^^} | cut -c 1-9 | sed 's# 0X##1' | cut -c 3-6) #/ cut -c 4-9 for 12-bit
  DEC=$(echo "ibase=16; $HEX" | bc)

  #Convert to voltage in V
  V_meas=$(echo "scale=10; res=5/65536*$DEC; if(res<1 && res > 0) print 0; res" | bc)
  DELAY=0.005
}

```

Obr. 4.20: Kód funkce zajišťující konfiguraci I2C sběrnice pro komunikaci AD převodníku s Raspberry Pi. Obsahuje všechny součásti od definice konfiguračního bytu, přes adresaci čipu až po čtení hodnoty a její převod na reálné číslo.

převodník pracovat, a nastaví se hodnota konfiguračního bytu (např. pro kanál 3 je tato hodnota rovna 0x58). Z principu funkce této sběrnice se pak konfigurační byte zašle na adresu AD převodníku, v tomto případě na adresu 0x68. Poté je převodník připraven odeslat data. Zvoláním funkce `i2ctransfer` v uvedeném formátu přečte počítač ze sběrnice 3 byty (2 byty data 1 byte konfigurace). Následně se hodnoty převedou na reálná čísla a je jim tak přiřazena hodnota napětí.

Nastavení GPIO pinů Naneštěstí se nepovedlo na Raspberry Pi zprovoznit komunikaci po SPI sběrnici pro komunikaci s posuvnými registry, tudíž bylo třeba se uchýlit k řešení na nejnižší úrovni. Komunikace s registry tak bude probíhat přímým zasíláním signálů podle diagramu uvedeném v datasheetu (viz [17]). Tento způsob komunikace se nazývá „*bit bang*“. Pro možnost aplikace bit bangu je třeba konfigurovat výstupní piny na počítači, což ve skriptu zajišťují funkce `gpio_init_low` a `gpio_init_high`.

```

bitbang_high() {
    BIT_H="$1"
    CLK_H 0
    DATA_H "$BIT_H"
    sleep "$DELAY"
    CLK_H 1
    sleep "$DELAY"

    DATA_H 1
}

```

Obr. 4.21: Kód funkce realizující bit bang pro komunikaci s posuvnými registry. Simuluje funkcionalitu synchronní sběrnice.

Aplikace bit bangu Bit bang je způsob komunikace, při němž je simulována funkce sběrnice. Celý algoritmus spočívá ve střídání hodinových a datových signálů tak, jak bývá naznačeno v diagramech komunikace v datasheetech jednotlivých integrovaných obvodů. Funkci `bitbang_high`, která tuto funkcionalitu zajišťuje pro high-side posuvné registry, lze vidět na Obr. 4.21. Hodnoty datových bitů se zpravidla mění ve chvíli, kdy je hodinový signál neaktivní ($\text{CLK} \rightarrow 0$; $\text{DATA} \rightarrow \text{"value"}$). Jakmile je datový bit nastaven, hodinový signál se aktivuje a s nástupnou hranou pošle data příjemci ($\text{CLK} \rightarrow 1$). Data se vzorkují pouze při náběžné hraně. Důvodem, proč jsou ve skriptu implementovány funkce pro high-side a low-side zvlášť, je to, že optočleny předřazené high-side posuvným registrům invertují vstupní signály. Před zápisem na GPIO pin je tedy znovu softwarově hodnota bitů invertována, aby komunikace správně probíhala.

Výpočet izolačního odporu AD převodník snímá napětí na třech svých kanálech. Pro dodržení podmínek zadání je však třeba toto napětí převést na izolační odpor. Již dříve bylo zmíněno, že tento převodní vztah bude určen experimentálně. Na místo testovaného kabelu byly zapojeny rezistory s odpory $10\text{ M}\Omega$, $8\text{ M}\Omega$, $6\text{ M}\Omega$, $4\text{ M}\Omega$, $2\text{ M}\Omega$, $1\text{ M}\Omega$, $500\text{ k}\Omega$, $10\text{ k}\Omega$ a $1\text{ k}\Omega$. Na základě hodnot napětí, které byly odečteny z AD převodníku při zapojení těchto rezistorů, se následně vytvořila převodní tabulka s lineárními závislostmi. Funkci `convert_r` realizující tuto převodní tabulku je možné vidět na Obr. 4.22. Každý blok podmínky zde vypočítá hodnotu izolačního odporu z rovnice přímky mezi dvěma body, označující naměřené napětí při těchto odporech. Důležitou informací také je, že při měření hodnot napětí byl kladen důraz na eliminaci možných odchylek, a každé měření tak bylo provedeno desetkrát. Výsledná hodnota je průměrem všech naměřených hodnot pro danou hodnotu odporu.

```

convert_r() {
    voltage="$1"
    if [ $(echo "$1" '>=' "1.27478" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol="10000000"
    elif [ $(echo "$1" '>=' "1.27335" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-0.9879)/0.00000003" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "1.25795" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-1.1948)/0.000000008" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "1.25372" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-1.2368)/0.000000003" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "1.24466" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-1.2258)/0.000000004" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "1.2125" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-1.1848)/0.00000001" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "1.15527" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-1.098)/0.00000006" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "1.06075" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-0.9632)/0.0000002" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "0.11572" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-0.0969)/0.000002" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "0.0176" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "($1-0.0053)/0.00001" / bc -l)
    elif [ $(echo "$1" '>=' "0" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_isol=$(echo "$1/0.00002" / bc -l)
    else
        echo "An error ocured while measuring an insulation resistance" 1>&2;
        exit -1
    fi

    if [ $(echo "$R_isol" '>=' "1000000" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_OUT=$(echo "$R_isol"/1000000 / bc -l)
        order="M"
    elif [ $(echo "$R_isol" '>=' "1000" / bc -l) -eq 1 ]; then
        R_OUT=$(echo "$R_isol"/1000 / bc -l)
        order="k"
    else
        order="R"
    fi
}

```

Obr. 4.22: Kód funkce realizující převod hodnoty napětí, snímané AD převodníkem, na hodnotu izolačního odporu. Převodní vztahy byly určeny experimentálně.

Algoritmus prováděného testu Samotný algoritmus je postaven jednoduše. Vstupem je textový soubor s počtem testovaných kanálů, počtem celkových kanálů a s předpisem předpokládaných propojení. Skript v první řadě vynuluje posuvné registry, čehož dosáhne zasláním dostatečného množství nulovacích bitů. Poté aktivuje první kanál v high-side, vůči němuž pak otestuje všechny potřebné kanály v low-side. Při každém posunu bitu je přečtena hodnota z AD převodníku, vypočten izolační odpor a provedeno rozhodnutí o tom, zda jsou aktuálně testované prvky propojeny. Kanály nad rámec vstupních dat jsou považovány za nezapojené a program po otestování nastaveného počtu vynuluje obsah registru. Následně posune bit v high-side a celý proces se opakuje. Skript končí se všemi kanály vypnutými a na základě porovnání výstupního souboru se vstupním hlásí „PASS“, tedy že test proběhl úspěšně, nebo „FAIL“ v opačném případě. Celý algoritmus zapsán v pseudokódu je zobrazen níže.

Algoritmus 1: Testování kabelového svazku

Input: $N \leftarrow$ počet testovaných prvků, testované kanály

Input: $T \leftarrow$ celkový počet dostupných kanálů

inicializace posuvných registrů;

bitbang_high 0;

forall i z N **do**

 bitbang_low 1;

for j z N **do**

 přečíst hodnotu ADC;

 výpočet izolačního odporu;

 rozhodnout o kontinuitě;

 bitbang_low 0;

end

 vynulovat low-side registr;

 bitbang_high 1;

end

vynulovat high-side registr;

porovnat výstup s očekávaným výsledkem;

if *výstup je správně* **then**

 exit "PASS";

else

 exit "FAIL";

end

5 Testování realizovaného zařízení

Poslední kapitola této práce bude věnována testování zhotoveného prototypu měřicího zařízení. Celkem byly provedeny tři testy, během kterých se ověřila funkčnost jak celého obvodu, tak i řídicího algoritmu.

Úkolem prvního testu bylo ověřit funkci zařízení „naprázdno“. Konektor pro připojení testovaného kabelu tak zůstal nezapojený. Testovací předpis byl vytvořen pro otestování všech 16 kanálů, očekávaný výstup byl takový, že žádný z kanálů není propojen. Tento testovací předpis byl předán skriptu jako parametr. Jak je možné vidět na Obr. 5.1 vlevo, algoritmus otestoval všech 16 kanálů a ukončil sérii úspěchem. Výstupní seznam propojení je shodný s předpokládaným (viz Obr. 5.1 vpravo). V průběhu testu byly samozřejmě také odečítány hodnoty izolačního odporu, jejichž hodnoty byly očekávány „nekonečné“. Za nekonečnou hodnotu je považována taková, která převyšuje 10 MΩ. V tom případě pak skript zapíše tuto hodnotu, což se také stalo u všech kanálů, jak lze vidět na Obr. 5.1 dole.

[illegible]

Obr. 5.1: Výsledky prvního testu zařízení. Testováno bylo všech 16 kanálů, přičemž výstupy zůstaly nezapojeny. Test proběhl v pořádku a výstupy odpovídají skutečnosti.

Druhý test měl ověřit, zda je algoritmus schopen testovat méně kanálů, než je jejich celkový dostupný počet. Pro tento test byly do výstupního konektoru vsunuty drobné kabely zakončené dutinkami. Celkem bylo propojeno 6 výstupů na prvních 6 měřicích kanálech, vždy odpovídající piny. Očekávaný výstup byl zapsán do souboru testovacího předpisu, a to stylem 1–1, 2–2, 3–3 atd. (tedy diagonála v matici). Jak je možné vidět na Obr. 5.2 vlevo nahoře, vše proběhlo v naprostém pořádku a výstup je totožný s testovacím předpisem. Korektní výstup je k vidění i ve výstupním souboru i v souboru s hodnotami izolačních odporů (na Obr. 5.1 vpravo nahoře, resp. v dolní části), kde se v diagonále nachází hodnoty velmi blízké nule a všechny ostatní prvky mají mezi sebou „nekonečný“ izolační odpor.

```

pi@raspberrypi:~/dp $ ./run_test.sh
-----START-----
Testing channel: 1
Testing channel: 2
Testing channel: 3
Testing channel: 4
Testing channel: 5
Testing channel: 6
-----END-----
Test result: PASS
pi@raspberrypi:~/dp $ cat output.txt
100000
010000
001000
000100
000010
000001
pi@raspberrypi:~/dp $ cat results.txt
      1      2      3      4      5      6
1      0.0 R    9.7 M    9.5 M    9.5 M    9.5 M    9.5 M
2      9.6 M    9.7 R    9.8 M    9.5 M    9.5 M    9.5 M
3      9.5 M    9.5 M    9.5 R    9.8 M    9.5 M    9.5 M
4      9.5 M    9.5 M    9.5 M    9.5 R    9.8 M    9.5 M
5      9.5 M    9.5 M    9.5 M    9.6 M    9.6 R    9.8 M
6      9.5 M    9.5 M    9.6 M    9.5 M    9.6 M    9.7 R

```

Obr. 5.2: Výsledky druhého testu zařízení. Testováno bylo prvních 6 kanálů, přičemž výstupy byly zapojeny stylem 1 ku 1. Test proběhl v pořádku a výstupy odpovídají skutečnosti.

Pro poslední test byly použity stejné nastavení testu a stejný testovací předpis, jako v předchozím případě. Cílem testu bylo otestovat, zda zařízení rozpozná nežádoucí zkratky nebo propojení. Z toho důvodu byly první dva zapojené kabely navzájem zkratovány. Jak je možné pozorovat na Obr. 5.3 vlevo nahoře, test byl ukončen neúspěšně (výsledek „FAIL“). V Dalších částech stejného obrázku jsou pak ukázány podoby výstupních souborů, které jasně ukazují propojení prvních dvou měřicích kanálů. Tímto tedy byla ověřena správná implementace testovacího skriptu i správná funkce celého zařízení.

```

pi@raspberrypi:~/dp $ ./run_test.sh
-----START-----
Testing channel: 1
Testing channel: 2
Testing channel: 3
Testing channel: 4
Testing channel: 5
Testing channel: 6
-----END-----
Test result: FAIL
pi@raspberrypi:~/dp $ cat output.txt
110000
110000
001000
000100
000010
000001
pi@raspberrypi:~/dp $ cat results.txt

```

	1	2	3	4	5	6
1	0.0 R	9.8 R	9.5 M	9.5 M	9.5 M	9.5 M
2	9.8 R	9.7 R	9.8 M	9.5 M	9.5 M	9.5 M
3	9.5 M	9.5 M	9.5 R	9.8 M	9.5 M	9.5 M
4	9.5 M	9.5 M	9.5 M	9.5 R	9.8 M	9.5 M
5	9.5 M	9.5 M	9.5 M	9.6 M	9.6 R	9.8 M
6	9.5 M	9.5 M	9.6 M	9.5 M	9.6 M	9.7 R

Obr. 5.3: Výsledky třetího testu zařízení. Test probíhal stejně jako předchozí zmíněný, avšak první dva kanály byl navzájem propojeny tak, že mezi nimi vznikl zkrat. Podle očekávání se test ukončil s neúspěchem a reálný výstup odpovídá předpokladům.

Závěr

Tato práce se zabývá problematikou výroby a testování kabelů a kabelových svazků. Stručně zde byly definovány všechny používané termíny, rozebrána důležitá úskalí používání kabelových svazků a rovněž diskutovány jejich zkoumané vlastnosti. V úvodu práce byly popsány charakteristické vlastnosti kabelů, ze kterých byly následně vybrány a podrobněji zkoumány ty nejvíce relevantní a nejběžněji zkoušené. Jejich významy a definice jsou v práci dostatečně vysvětleny.

Následně byly tyto vybrané charakteristické vlastnosti posuzovány z hlediska jejich testování. V práci byla věnována kapitola pro detailnější popis toho, z jakého důvodu je právě tyto vlastnosti důležité zkoušet, a také jak tyto zkoušky probíhají a na jakém principu jsou založeny.

Poté přišlo na řadu praktické využití těchto znalostí a započal návrh testeru kabeláže. Byla provedena analýza požadavků s ohledem na zadání a následně proběhl průzkum trhu s dostupnými zařízeními, která tyto požadavky splňují. Po načerpání inspirace k řešení se přistoupilo k vlastnímu návrhu, který zahrnoval řešení důležitých otázek v oblastech napájení, měření a přepínání. Každý bod návrhu byl navržen tak, aby splňoval zadání práce a aby celé řešení bylo co možná nejjednodušší.

S hotovým návrhem se přistoupilo k samotné fyzické realizaci navrženého zařízení. Po finálním ujasnění některých požadavků na prototyp byl v práci popsán proces výběru potřebných komponent, které byly k sestavení prototypu potřeba. Při jejich výběru se kladl důraz na rozměry, elektrické vlastnosti, uživatelskou přívětivost, a nakonec i cenu. S hotovým seznamem se poté začalo navrhovat obvodové schéma, přičemž všechny jeho součásti byly v práci ukázány a podrobně popsány (včetně jejich funkcí). Na základě schématu byly navrženy desky plošných spojů, které se následně zadaly vyrobit. Vyrobené desky byly následně osazeny vybranými součástkami a vytvořil se řídicí software, aby bylo možné celé zařízení otestovat.

Testování proběhlo ve třech krocích, vždy s odlišnými vstupními podmínkami. Všechny provedené testy se dokončily s předpokládanými výsledky, čímž se ověřila správná funkce jak zařízení samotného, tak i implementace řídicího software. Celé testování bylo zadokumentováno a v práci i popsáno.

Zhotovený prototyp jistě otevírá cestu pro jeho další zdokonalování. V budoucnu by bylo možné doimplementovat například automatické rozpoznávání počtu připojených prvků nebo rychlejší řízení. Jistě by nebylo na škodu také navrhnout (a například zhotovit 3D tiskem) pro zařízení uzavíratelný box, čímž by se eliminovaly interakce s plošnými spoji a možnost náhodného poškození a bylo by možné pracovat s testerem jako s „černou skříňkou“.

Literatura

- [1] Adaptronics: homepage. online, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/3rPcIUz>
- [2] Adaptronic Prüftechnik GmbH, Wertheim, Německo: *KT 638 – Solid and fastest high voltage tester*. 2019, datasheet.
URL <https://bit.ly/3o9jYZ7>
- [3] Bayliss, C.; Hardy, B.: Chapter 12 - Cables. In *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, Oxford: Newnes, čtvrté vydání, 2012, ISBN 978-0-08-096912-1, s. 397 – 466.
- [4] Bi, Z.; Pomalaza-raez, C.; Hershberger, D.; aj.: Automation of Electrical Cable Harnesses Testing. *Robotics*, ročník 7, prosinec 2017: str. 13, doi:10.3390/robotics7010001.
- [5] Bishop, O.: Topic 29 - Cable Transmission. In *Electronics - Circuits and Systems (Fourth Edition)*, Oxford: Newnes, fourth edition vydání, 2011, ISBN 978-0-08-096634-2, s. 247 – 252.
- [6] Cable Assembly vs. Wire Harness. online, srpen 2013, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/340titL>
- [7] Cirris Systems: homepage. online, cit. 28.12.2020.
URL <https://www.cirris.com/>
- [8] Cirris Systems, Salt Lake City, USA: *Cirris CH2TM high voltage harness tester*. 2020, datasheet.
URL <https://bit.ly/2MteBGf>
- [9] Dynalab test systems: NX Hipot – Specifications. online, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/3b2v8v6>
- [10] Eaton Industries Manufacturing, Morges, Švýcarsko: *Operating manual SYNOR 5000 series*. 2014.
URL <https://bit.ly/2WZV95Q>
- [11] EPLAN ENGINEERING: *Help: Cable – definition of term*. srpen 2020, uživatelská příručka firmy EPLAN.
URL <https://bit.ly/356sbG7>
- [12] HOMEPRO, E.: What is transition contact resistance and how to deal with it. online, cit. 2.5.2021.
URL <https://bit.ly/3gW5ICb>

- [13] Infineon: *BSP89 Small-Signal-Transistor*. listopad 2012, datasheet.
URL <https://bit.ly/33qkMz0>
- [14] LeGere, B.: Cable assembly and a wiring harness: What's the difference? online, březen 2018, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/37TTkhe>
- [15] Microchip Technology: *MCP3422/3/4 – 18-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I²C Interface and On-Board Reference*. březen 2009, datasheet.
URL <https://bit.ly/3eYRTjW>
- [16] ON Semiconductors: *H11L1M – OPTOISOLATORS LOGIC OUTPUT*. březen 2003, datasheet.
URL <https://bit.ly/3b73fAX>
- [17] Philips Electronics: *74HC164; 74HCT164 8-bit serial-in, parallel-out shift register*. duben 2005, datasheet.
URL <https://bit.ly/3uveriK>
- [18] Philips semiconductors: *BSP230 P-channel enhancement mode vertical D-MOS transistor*. říjen 1997, datasheet.
URL <https://bit.ly/33jbxBJ>
- [19] Pionteck, J.; Wypych, G.: Typical Methods of Quality Control of Antistatics. In *Handbook of Antistatics (Second Edition)*, ChemTec Publishing, druhé vydání, 2016, ISBN 978-1-895198-95-9, s. 39 – 63.
- [20] Saini, A.: Insulation Resistance of a Cable. online, květen 2017, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/2KYsCuJ>
- [21] Sefelec: homepage. online, cit. 28.12.2020.
URL <https://www.sefelec.com/>
- [22] Sefelec sas, Lognes, Francie: *SEFELEC SYNOR 5000H*. 2014, datasheet.
URL <https://bit.ly/2X3Xhd2>
- [23] Tappero, F.; Jahshan, D.; Hutchinson, P.; aj.: *KiCad – Getting Started in KiCad*. KiCad, květen 2015, cit. 4.5.2021.
URL <https://bit.ly/3ukEvgq>
- [24] Top Cable: *Electrical cable types, sizes and installation*. Cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/3mXmP62>

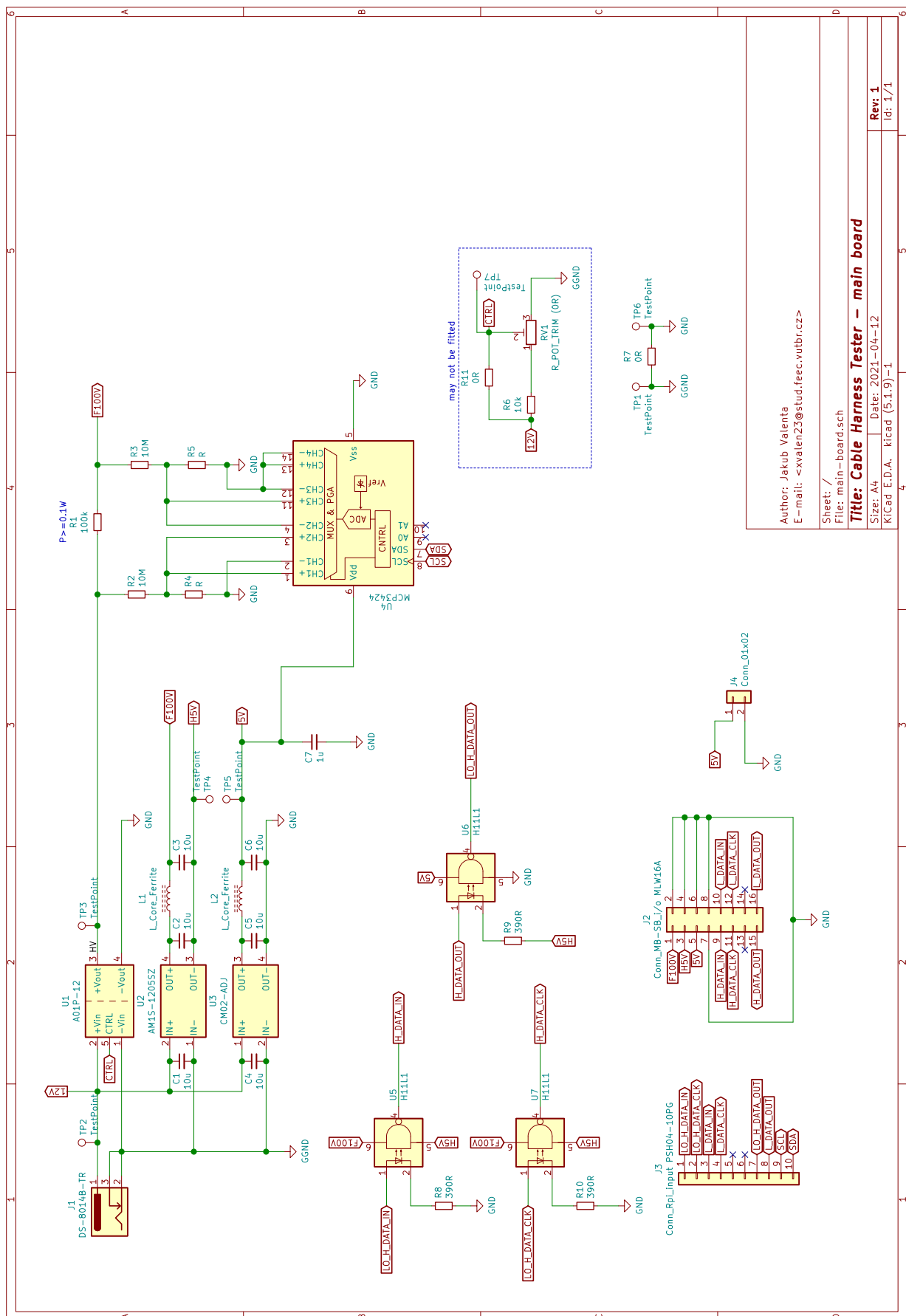
- [25] Vokálek, P.: *Problematika zaměřování poruch na kabelech*. diplomová práce, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, 2014.
URL <https://bit.ly/34W513S>
- [26] Cable tester VOLTcraft CT-7. online, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/3na517A>
- [27] W 434: Product description. online, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/2KKHFsn>
- [28] WEETECH: W 434 – The Variable and Flexible Test Device. online, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/3hCeHXF>
- [29] Wilkins, J.: Wire Harness vs. Cable Assembly: Understanding Their Differences. online, listopad 2019, cit. 28.12.2020.
URL <https://bit.ly/37TTkhe>
- [30] XP Power: *A Series DC – HVDC Converter*. prosinec 2020, datasheet.
URL <https://bit.ly/33jbxBJ>
- [31] Černý, V.: Seno představuje testery pro kabely a kabelové svazky. *Volty*, březen 2017: str. 9.
URL <https://bit.ly/3rIaB4V>
- [32] ČSN 33 2000-6 ed. 2: *Elektrické instalace nízkého napětí – Část 6: Revize*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, březen 2017.
- [33] ČSN 34 7010-82: *Elektrické kabely – Doplnující zkušební metody*. technická norma, Český normalizační institut, Praha, 2009.
- [34] ČSN EN 50395: *Elektrické zkušební metody kabelů a vodičů pro nízká napětí*. technická norma, Český normalizační institut, Praha, 2006.
- [35] ČSN EN 60243-1 ed. 2: *Elektrická pevnost izolačních materiálů – Zkušební metody – Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2014.
- [36] ČSN EN 60243-1 ed. 2: *Elektrická pevnost izolačních materiálů – Zkušební metody – Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2014.

- [37] ČSN EN 60243-3 ed. 2: *Elektrická pevnost izolačních materiálů – Zkušební metody – Část 3: Dodatečné požadavky na impulzní zkoušky*. technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2014.
- [38] Šavel, J.: *Elektrotechnologie: materiály a technologie v elektronice a elektrotechnice*. Praha: BEN – technická literatura, 1999, ISBN 80-86056-75-9.

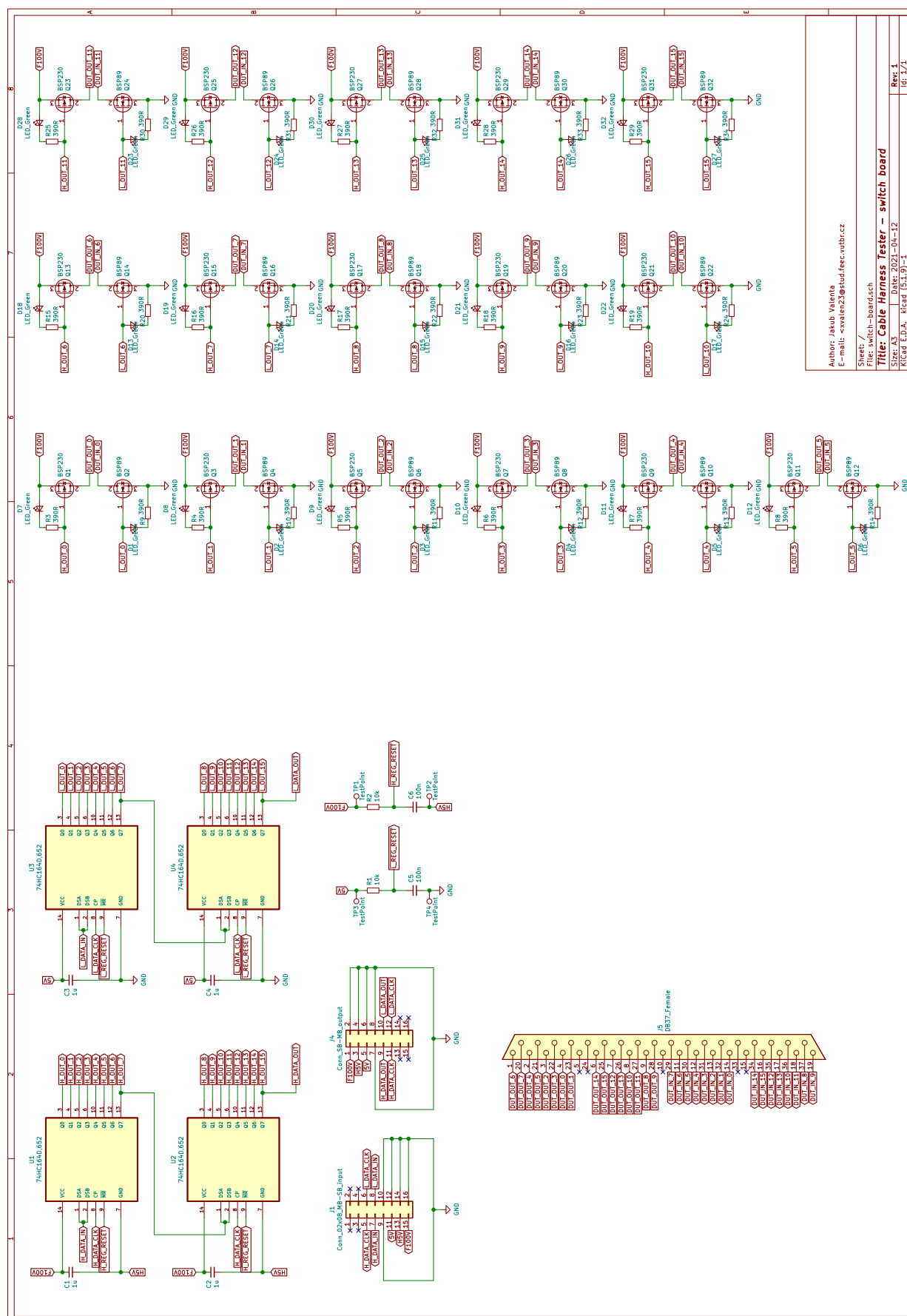
Seznam příloh

A Schéma napájecího obvodu	71
B Schéma spínačového obvodu	72
C Návrh DPS napájecího obvodu	73
D Návrh DPS spínačového obvodu	75
E Struktura přiloženého média	79

A Schéma napájecího obvodu

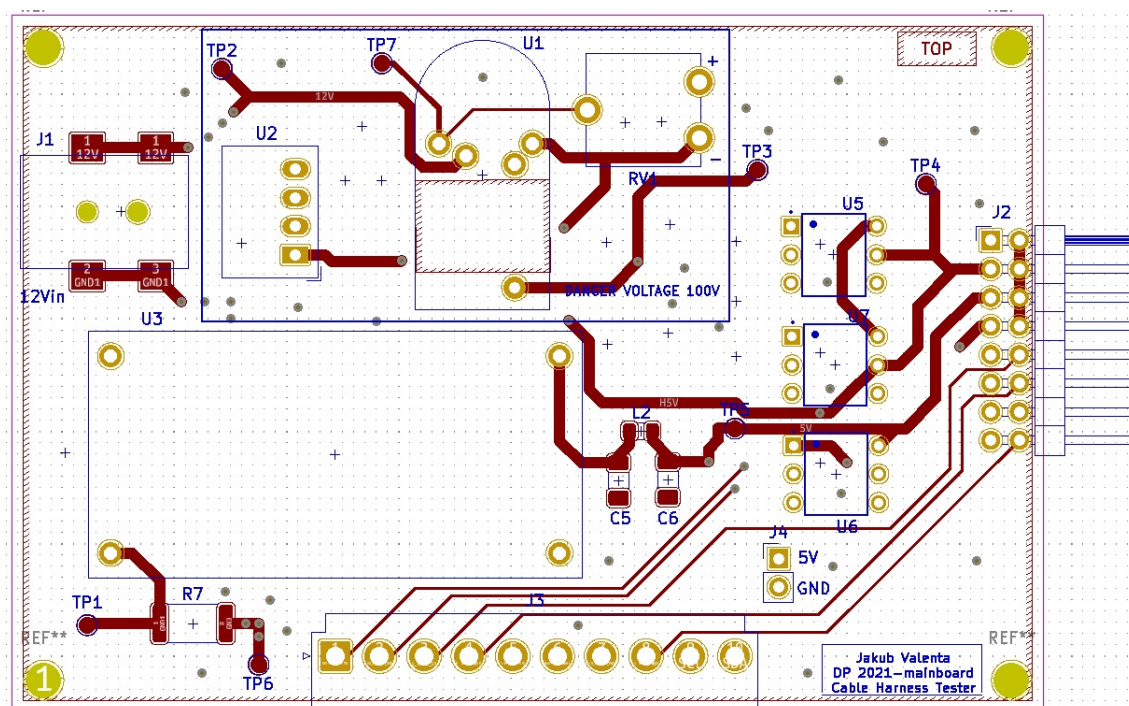


B Schéma spínačového obvodu



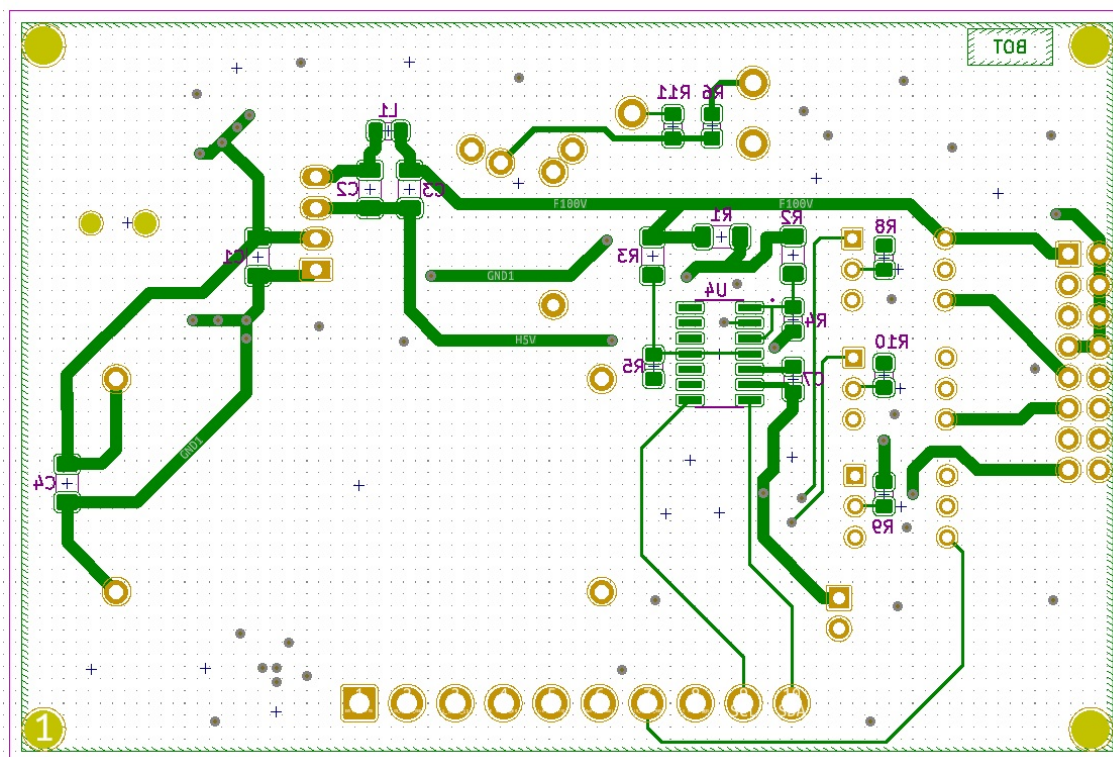
C Návrh DPS napájecího obvodu

Na Obr. C.1 je možné vidět návrh horní vrstvy plošného spoje napájecího obvodu. Červenou barvou jsou zde naznačeny vodivé cesty a pájecí plošky na této vrstvě. Modré značení přísluší potisku desky na horní straně desky. Na místě oranžových kruhů bude provedeno prokovené vrtání pro připojení součástek THT (Through-hole technology, připojení „skrze desku“). Oproti tomu žluté kruhy značí neprokovené otvory, které slouží pro mechanické upevnění součástek nebo celé desky. Zbývající části vykreslené šedou barvou znamenají prokovené průchodky, tzv. vias., díky nimž je možné vyvedení vodivé cesty na jinou vrstvu DPS. V téměř celé ploše horní vrstvy bylo použito vylití mědi. Tato plocha byla následně připojena k síti GND, tedy k potenciálu země.



Obr. C.1: Návrh horní vrstvy DPS napájecího obvodu

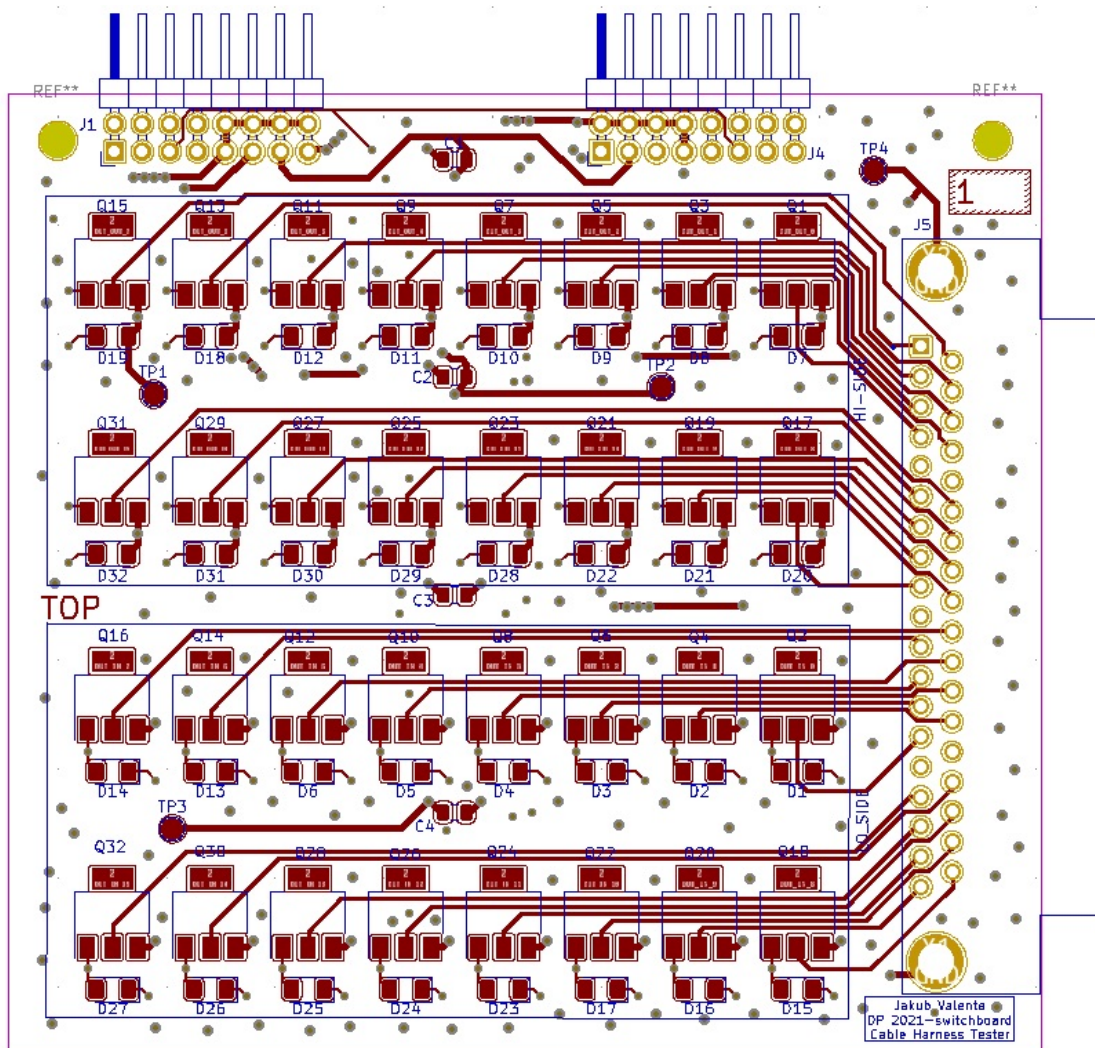
Druhá strana stejné desky je zobrazena na Obr. C.2. Prokovené a neprokovené vrtání, stejně jako vias zůstávají vykresleny stejnými barvami jako v předchozím případě. Změnilo se však označení vodivé cesty a pájecích plošek, zde zelenou barvou. Potisk spodní strany zaznačen barvou fialovou. Stejně jako v případě horní vrstvy, i zde byla téměř v celé ploše vylita měď, rovněž připojena k potenciálu GND.



Obr. C.2: Návrh spodní vrstvy DPS napájecího obvodu

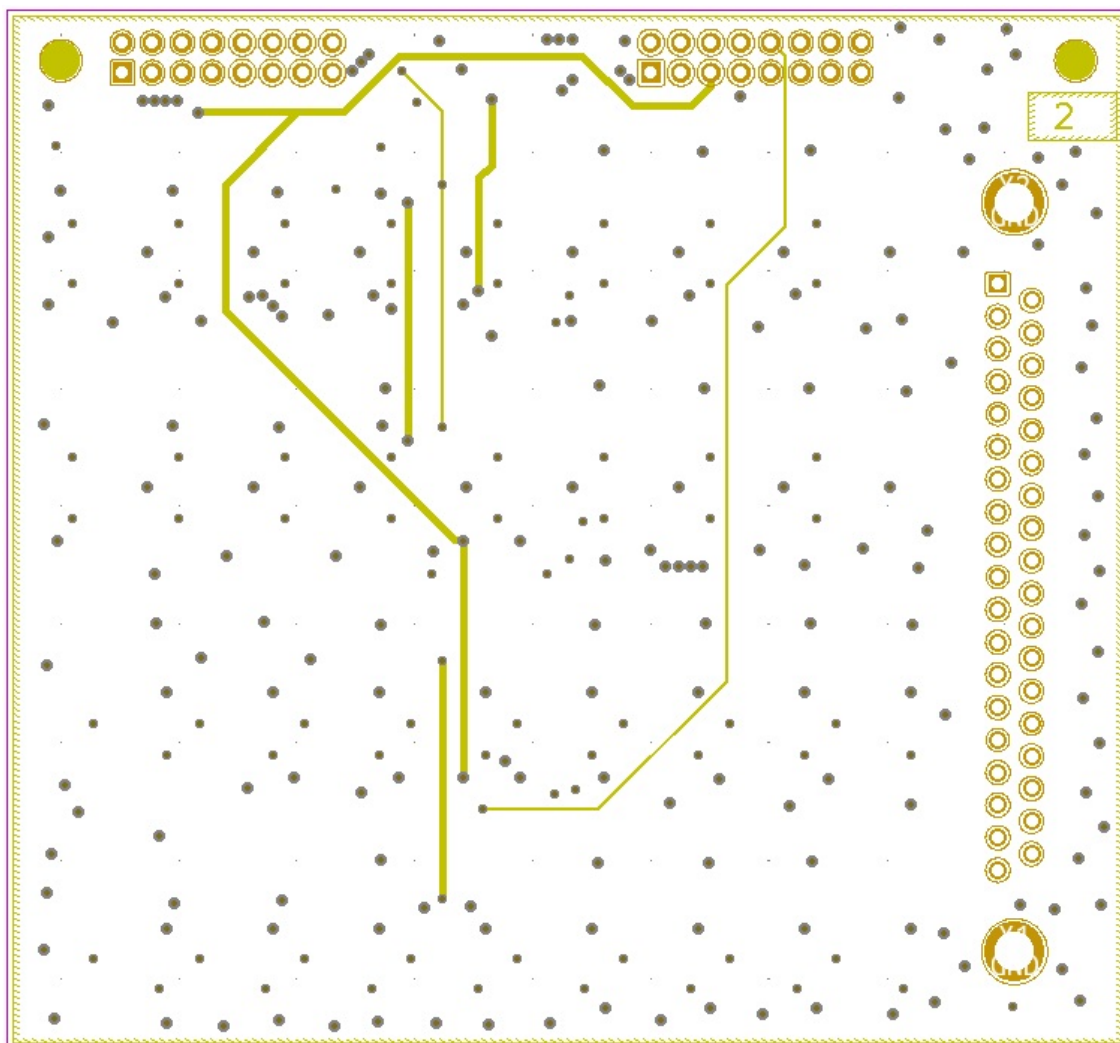
D Návrh DPS spínačového obvodu

Druhá deska plošného spoje se sestává ze 4 vrstev. Návrh horní vrstvy lze vidět na Obr. D.1. Podobně jako u horní vrstvy předchozí desky jsou zde vodivé cesty a pájecí plošky naznačeny červenou barvou, prokovené a neprokovené otvory pak oranžovou a žlutou. Vias opět vybarveny šedě, potisk vrstvy tmavě modrou barvou. Rozdílem oproti DPS napájecího obvodu zde není provedeno vylití mědi a celá vrstva je tak založena pouze na oddělených vodivých cestách.



Obr. D.1: Návrh horní vrstvy DPS spínačového obvodu

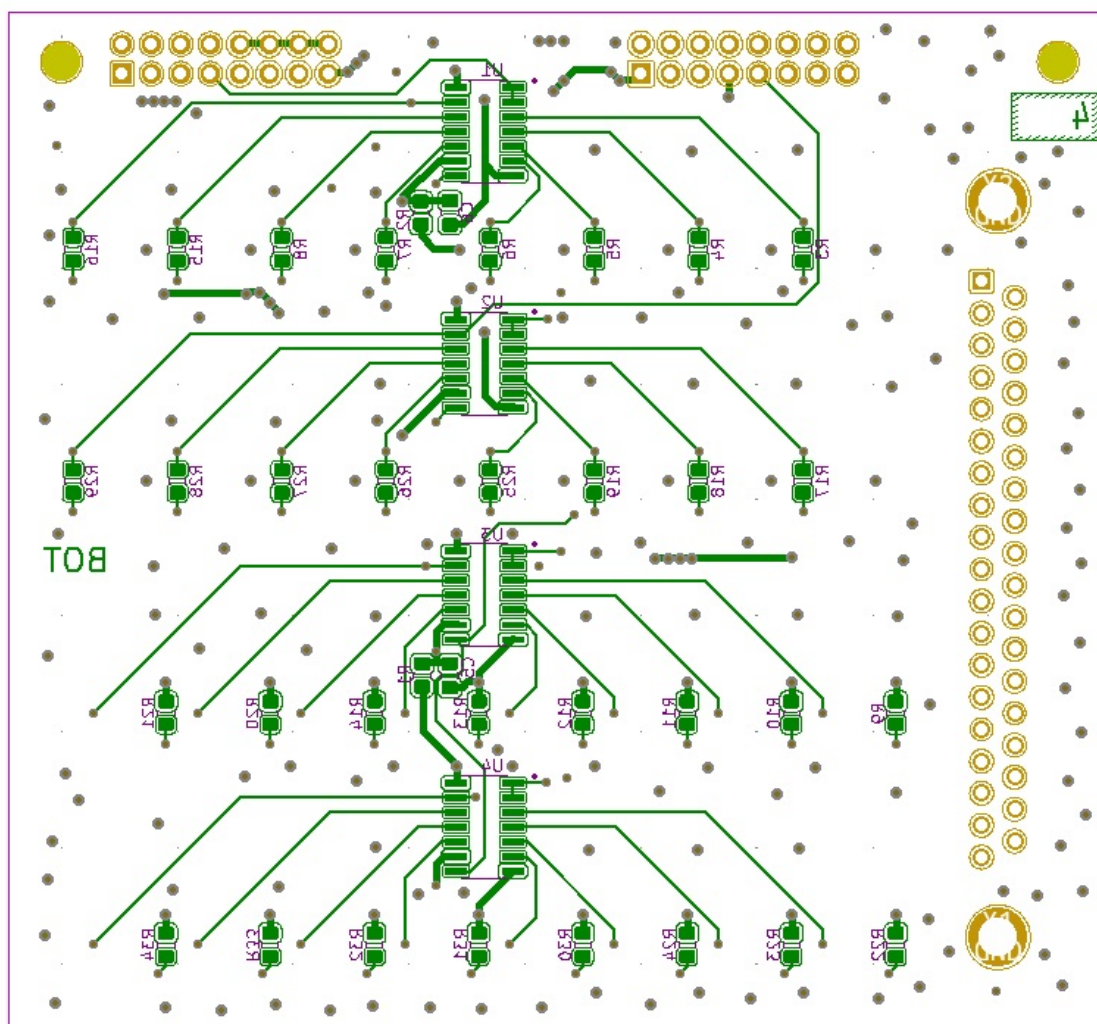
První vnitřní vrstva neobsahuje tolik různých prvků, v celé její ploše bylo provedeno vylití mědi, jež byla následně připojena k síti F100V. Kvůli množství vedení v povrchových vrstvách byly pro účely šetření prostoru některé vodivé cesty vedeny i v této vrstvě. Na Obr. D.2 jsou naznačeny žlutou barvou (nejedná se o stejné prvky jako neprokovené otvory).



Obr. D.2: Návrh první vnitřní vrstvy DPS spínačového obvodu

Obr. D.3: Návrh druhé vnitřní vrstvy DPS spínačového obvodu

Poslední navrhovanou vrstvou je spodní povrchová vrstva, značená na Obr. D.4 zeleně. Opět, jako v horní vrstvě zde nebyla vylita měď v žádné ploše, a tak je i tato vrstva zhotovena pouze z oddělených vodičových cest různých tříd.



Obr. D.4: Návrh spodní vrstvy DPS spínačového obvodu

E Struktura přiloženého média

V této příloze je popsána struktura média DVD přiloženého k práci. DVD obsahuje zdrojové kódy \LaTeX , elektronickou verzi práce, návrhové soubory a řídicí skript. Struktura DVD je následující:

```
/
├── latex ..... Soubory  $\text{\LaTeX}$ 
├── Tester-kabeláže.pdf ..... Elektronická verze práce
├── main-board.pdf ..... Obvodové schéma zapojení napájecí desky
├── switch-board.pdf ..... Obvodové schéma zapojení spínačové desky
├── run_test.sh ..... Testovací skript pro RaspberryPi
├── kicad_main-board ..... Soubory KiCad s návrhem napájecího obvodu
│   ├── main-board.pro
│   ├── main-board.sch
│   ├── main-board.kicad_pcb
│   ├── lib ..... Vlastní knihovna značek a pouzder
│   └── output ..... Soubory pro výrobu Gerber
├── kicad_switch-board ..... Soubory KiCad s návrhem spínačového obvodu
│   ├── switch-board.pro
│   ├── switch-board.sch
│   ├── switch-board.kicad_pcb
│   ├── lib ..... Vlastní knihovna značek a pouzder
│   └── output ..... Soubory pro výrobu Gerber
└── convert_r.xlsx ..... Tabulka s převody napětí na izolační odpor
```